

Institut für Molekulare Mechanismen bei Krankheiten
der Vetsuisse-Fakultät Universität Zürich

Direktor: Prof. Dr. med. vet et phil. II Michael Hottiger

Musculoskeletal Research Unit (MSRU)
Leiterin: Prof. Dr. med. vet. Brigitte von Rechenberg, Dipl. ECVS

Arbeit unter wissenschaftlicher Betreuung von
Prof. Dr. med. Moritz Tannast

**Die topographische Anatomie der Femurkopfdurchblutung beim Schaf –
Relevanz für die Korrektur eines experimentell induzierten
femoroacetabulären Impingements im Tiermodell**

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der
Vetsuisse-Fakultät Universität Zürich

vorgelegt von

Nadja Wolfer

Tierärztin

aus Villingen-Schwenningen, Deutschland

genehmigt auf Antrag von

Prof. Dr. med. vet. Brigitte von Rechenberg, Referentin

Prof. Dr. med. Klaus Arno Siebenrock, Korreferent

2018

in Erinnerung an

Nico

Zusammenfassung.....	1
Summary	2
1 Einleitung	3
1.1 Zielsetzung der Arbeit.....	4
2 Literaturübersicht	5
2.1 Das femoroacetabuläre Impingement beim Menschen	5
2.1.1 Das Syndrom.....	5
2.1.2 Therapie	7
2.1.3 Radiologische Darstellung des FAI	8
2.2 Risiken der Off-Set Korrektur	9
2.2.1 Avaskuläre Femurkopfnekrose	9
2.2.2 MRI zur Detektion einer AVN	9
2.3 Die Blutversorgung des Femurkopfes beim Menschen	10
2.4 Das Schaf als Tiermodell	12
2.4.1 Lagebezeichnungen Mensch-Schaf	12
2.4.2 Impingement Induktion.....	12
2.4.3 Übertragbarkeit des Tiermodells.....	13
2.5 Die Anatomie der Schafhüfte.....	14
2.5.1 Knochen und Knorpel	14
2.5.2 Muskeln.....	15
2.5.3 Gefäße	18
2.6 Problemstellung	19
3 Material und Methoden	20
3.1 Aufbau der Studie	20
3.2 Schafmanagement	21
3.3 Teilstudien.....	22
3.4 Angiographische Computertomographie (CTA)	22
3.4.1 Korrosionspräparate	24
3.4.2 Silikoninjektionspräparate	25
3.4.3 Verteilung der vaskulären Foramina.....	26

3.4.4	Off-Set Korrektur beim Schaf: In vivo Modell und Überprüfung der Vaskularität des Femurkopfes mittels MRI	28
4	Resultate.....	41
4.1	Computertomographische Angiographie (CTA)	41
4.2	Silikoninjektionspräparate	45
4.3	Korrosionspräparate	58
4.4	Zählung und Verteilung der vaskulären Foramina	62
4.5	MRI	63
5	Diskussion.....	64
6	Schlussfolgerungen	69
7	Literaturverzeichnis	70
8	Abkürzungsverzeichnis	75
9	Danksagung.....	1
10	Lebenslauf.....	3
11	Anhang	4

Zusammenfassung

Hintergrund: Der von Natur aus in seinem dorsalen Anteil asphärische Femurkopf (FK) des Schafs ähnelt der humanen Cam-Deformität. Durch eine Varisationsosteotomie kann im Schafmodell ein entsprechendes femoroacetabuläres Impingement (FAI) vom Cam-Typ induziert werden. Beim Schaf ist der asphärische Anteil dorsal am FK, dort wo beim Menschen die superioren retinakulären Gefäße verlaufen. In der Literatur sind keine genauen Angaben über die ovine FK-Durchblutung vorhanden. Eine sichere Osteochondroplastik (OCP) beim Schaf wäre nur möglich, wenn die retinakuläre Durchblutung nicht am Ort der natürlichen ovinen Asphärizität verlaufen würde.

Ziel: Beschreibung der vaskulären Anatomie des ovinen FK mit dem Ziel, eine sichere OCP durchführen zu können.

Methoden: An insgesamt 50 Schafhüften wurden mittels computertomographischer Angiographie, Silikoninjektionspräparaten, vaskulären Korrosionspräparaten und durch die Zählung sowie Verteilung der vaskulären Foramina am FK/- Halsübergang ausgewertet, was eine vollständige Beschreibung der Blutversorgung des ovinen FK von der Aorta bis zum Eintritt der retinakulären Gefäße in den FK erlaubt.

Resultate: Der ovine FK wird hauptsächlich von einem kranialen (ausgehend von der Arteria circumflexa femoris lateralis (ACFL)) und einem kaudalen Retinakulum (ausgehend von der Arteria circumflexa femoris medialis (ACFM)) versorgt.

Konklusion: Eine sichere OCP ohne die Gefahr einer aseptischen Femurkopfnekrose ist beim FAI-Schafmodell möglich.

Stichwörter: Schaf, Femurkopf, Blutversorgung, femoroacetabuläres Impingement

Summary

Background: Sheep hips have a natural non-spherical head similar to a cam-type deformity in human beings. By performing an intertrochanteric varus osteotomy, cam-type femoroacetabular impingement can be induced experimentally. In sheep, the aspherical portion is located dorsally – exactly matching the region where the superior retinacular vessels enter the femoral head-neck junction in human beings.

Objective: To describe the vascular anatomy of the femoral head in sheep in order to perform safe femoral osteochondroplasty of the dorsal femoral asphericity in sheep.

Methods: 50 sheep hips were analyzed using CT angiography (18 hips), post mortem intravascular latex injection (6 hips), vascular corrosion casting (6 hips), and analysis of the distribution of vascular foramina around the femoral head-neck junction (20 hips). CT angiography was virtually segmented using Osirix software. The found vascular tree was used to describe the main arterial branches. The latex injection was used to describe the topographical anatomy of smaller arteries to the femoral head. The vascular corrosion casting showed the entries of the arteries into the bone. This approach allows the full description of the ovine femoral head blood supply from the aorta to the retinacular vessels.

Results: The ovine femoral head is mainly supplied by a cranial retinaculum (originating from the lateral femoral circumflex artery) and a caudal retinaculum (originating from the medial femoral circumflex artery).

Keywords: sheep, femoral head, blood supply, femoroacetabular impingement

1 Einleitung

Das Femoroacetabuläre Impingement (FAI) ist eine häufige Ursache für das Entstehen einer Coxarthrose bei jungen Sportlern. Der Grund für das FAI sind anatomische Deformationen im Bereich des Hüftgelenks. Diese Deformationen führen bei bestimmten Bewegungen zu einem schmerzhaften Kontakt des Femurs mit dem Acetabulum und in der Folge zu Knorpelschäden im Hüftgelenk^{2,3}.

Man kann das FAI in einen Cam-Typ (Deformation im Bereich des Femurs) und einen Pincer-Typ (Deformation im Bereich des Acetabulums) unterteilen. In den meisten Fällen handelt es sich um eine gemischte Form⁴⁻⁶.

Ein operativer Eingriff zur Korrektur eines Cam-FAI besteht im Abtragen der meist anterior-superior lokalisierten Asphärizität im Bereich des Überganges zwischen Oberschenkelhals und- kopf, sodass es nicht mehr zu einem Kontakt zwischen Femur und Acetabulum in diesem Bereich kommen kann⁷.

Ein grosses Risiko bei der Korrektur des Cam-Typ FAI beim Menschen stellt die Verletzung der A. circumflexa femoris medialis (ACFM) dar, welche hauptsächlich für die vaskuläre Versorgung des Femurkopfes zuständig ist. Eine Schädigung dieser Arterie beziehungsweise ihrer den Femurkopf versorgenden Äste würde eine Nekrose des Femurkopfes nach sich ziehen⁸⁻¹⁰.

Die Operation ist nur sinnvoll, wenn die osteoarthrotischen Veränderungen noch nicht zu ausgeprägt sind. Bisher gibt es keine verlässlichen Methoden, die Knorpelschäden radiologisch nachzuweisen und den besten Zeitpunkt für einen operativen Eingriff zu bestimmen. Aus diesem Grund werden experimentelle Studien durchgeführt, für die ein Tiermodell verwendet werden muss, in welchem man nicht nur ähnliche Läsionen hervorrufen kann wie beim humanen FAI, sondern an dem auch eine Korrektur des FAI genauso wie beim Menschen möglich ist.

Für das FAI vom Cam-Typ hat sich das Schaf als Tiermodell etabliert¹¹. Das Schaf hat von Natur aus einen unrunder Femurkopf. Ein Impingement vom Cam-Typ kann durch eine intertrochantäre, zuklappende Varusosteotomie provoziert werden, bei welcher der unrunder Femurkopfanteil in Richtung der Hauptbelastungszone des Acetabulums gebracht wird¹¹.

Die chirurgische Intervention beim FAI vom Cam-Typ besteht beim Menschen und auch beim Versuchstier Schaf in einer Off-Set Korrektur des Femurkopf-/halsüberganges. An dieser Stelle befinden sich beim Menschen die Endbahnen des R. profundus der ACFM, die bei der Operation nicht verletzt werden dürfen. Ein genauer Verlauf der Gefässversorgung des Femurkopfes beim Schaf ist noch nicht beschrieben und damit ist nicht bekannt, wie gross das Risiko einer Gefässverletzung ist, wenn eine Off-Set Korrektur in diesem Bereich durchgeführt wird.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Mit vier verschiedenen Untersuchungsmethoden sollte die topographische Anatomie der Blutgefässversorgung des Femurkopfes beim Schaf dargestellt und im Anschluss überprüft werden, ob eine Off-Set Korrektur des Cam-Impingements möglich ist, ohne eine avaskuläre Femurkopfnekrose zu riskieren.

2 Literaturübersicht

2.1 Das femoroacetabuläre Impingement beim Menschen

2.1.1 Das Syndrom

Das femoroacetabuläre Impingement (FAI) ist mit einer geschätzten Prävalenz von 10 – 15% eine häufig vorkommende Erkrankung². Verantwortlich für das FAI sind Variationen in Grösse, Form und Konfiguration des Acetabulums, des Femurkopfes und des Übergangs von Femurkopf zu Femurhals¹². Das FAI kann in zwei Untertypen unterteilt werden, die sich in ihrem Pathomechanismus unterscheiden: Das Cam-Impingement, bei dem die Ursache am Femurkopf liegt und das Pincer-Impingement, bei dem die Ursache auf der Seite des Acetabulums liegt (siehe Abbildung 1)^{5,6,13}.

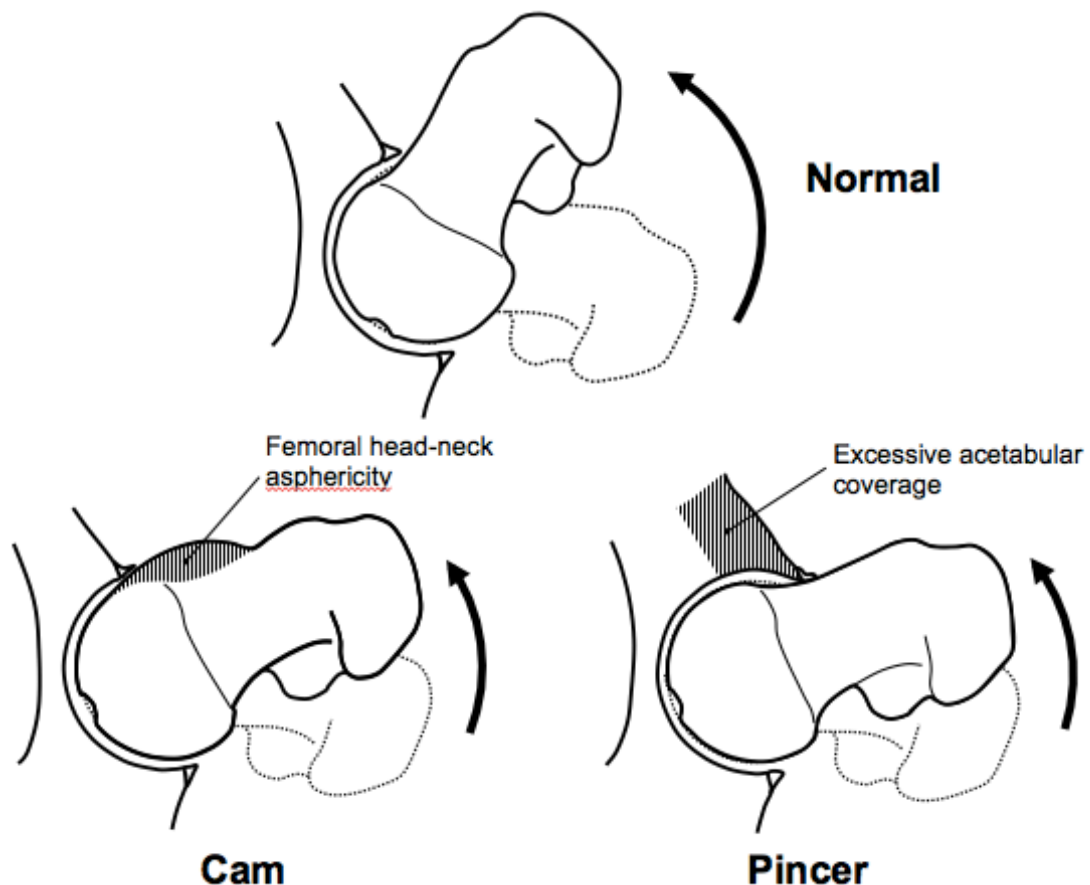


Abbildung 1: Mechanismus des FAI vom Cam- und Pincer-Typ (mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. med. Moritz Tannast, Inselspital Bern, Schweiz)

Die Entstehung eines FAI kann verschiedene Ursachen haben. Dass das Körpergewicht bei der Entstehung der primären Hüftgelenksarthrose eine Rolle spielt, konnte nicht nachgewiesen werden¹⁴. Pathologisch-anatomische Veränderungen können die Grundlage für FAI sein, besondere Bewegungsmuster scheinen allerdings zusätzlich

nötig zu sein. In bestimmten Fällen (z.B. extreme Bewegungen bei Balletttänzern) kann ein Impingement auch ohne primäre morphologische Veränderungen auftreten. Das FAI vom Cam-Typ kommt meistens bei 20 – 30jährigen Männern vor. Das FAI vom Pincer-Typ hingegen wird hauptsächlich bei 30 – bis 40 jährigen Frauen gesehen².

Das Cam-Impingement wird aufgrund der Form vom Femurkopf-/ halsübergang auch Nockenwellen-Impingement genannt. Die Ursache für das Impingement ist hier eine Asymmetrie des Übergangs von Femurkopf zum Femurhals. Für diese Asphärizität gibt es unterschiedliche Ursachen, wie z.B. Wachstumsstörungen, eine nicht therapierte Epiphyseolysis capitis femoris, Legg-Calvé-Perthes Disease oder eine Trauma-Spätfolge. Auch eine Wachstumsanomalie des Femurkopfes wird als ein möglicher Grund angesehen¹³.

In den meisten Fällen ist die Asphärizität am antero-superioren Anteil des proximalen Femurs am stärksten. Bei Bewegung des Gelenkes zwingt sich der Femurkopf, der durch die Asphärizität nicht mehr die ideale Passform hat, in das Acetabulum. Dadurch entstehen Knorpelschäden am Femurkopf und am antero-superioren Anteil des Acetabulums¹⁵ (siehe Abbildung 2). Der subchondrale Knochen reagiert auf den unphysiologischen Stress mit einer Erhöhung der Mineraleichte und damit der Härte des Knochens. Er ist dadurch weniger elastisch und anfälliger für Impingement-induzierte Avulsionsfrakturen des Acetabulumrandes¹⁶.

Beim Pincer-Impingement, das auch als Beisszangenmechanismus bezeichnet wird, liegt das Problem meistens in einer zu tiefen oder fehlorientierten Hüftpfanne. Die Morphologie des Schenkelhals-Femurkopf-Überganges kann dabei unauffällig sein. Die übermäßige Abdeckung des Femurkopfes durch das Acetabulum resultiert in einer zu starken Umfassung des Femurkopfes, vergleichbar mit dem Greifen einer Beisszange. Bei Bewegungen der Hüfte kommt es dadurch zu einem pathologischen Zusammenstoßen des Acetabulumrandes mit dem Schenkelhals-Femurkopf-Übergang. Hierbei fungiert das Labrum quasi als Stossdämpfer, reißt als Folge der übermäßigen Belastung ein und kann in fortgeschrittenem Stadium verknöchern. Knorpelschäden werden im gesamten Acetabulum gesehen¹⁵ (siehe Abbildung 2).

Ein reines Cam- bzw. Pincer-Impingement kommt nur selten vor (Cam- Impingement 20%, Pincer-Impingement 10%). In mindestens 70% der Fälle liegt eine gemischte Form vor¹⁵.

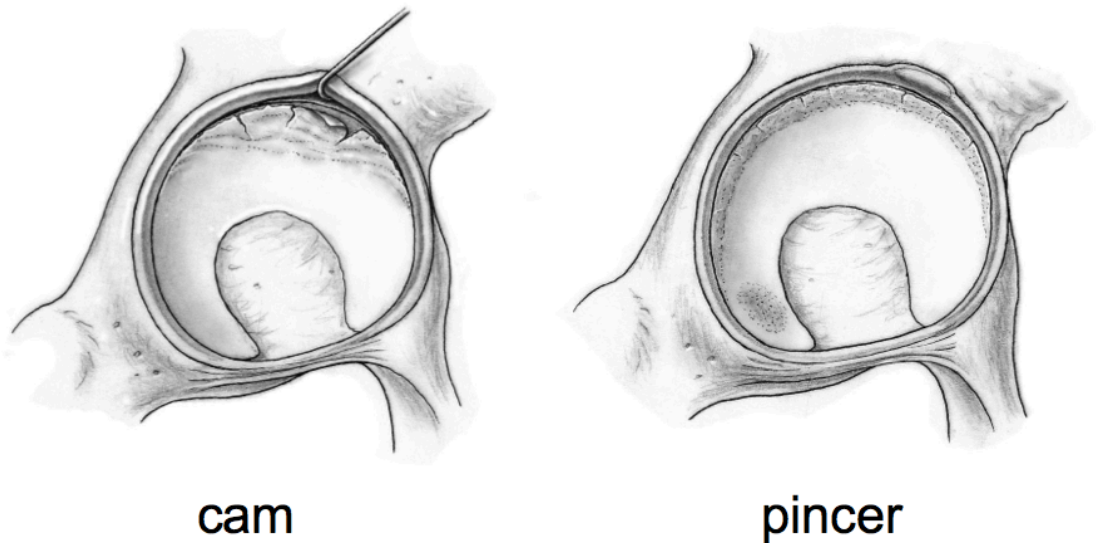


Abbildung 2: Knorpelläsionen des Acetabulums beim Cam-Impingement und beim Pincer-Impingement (mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. med. Moritz Tannast, Inselspital Bern, Schweiz)

Knorpelläsionen kommen überwiegend im antero-superioren Quadranten des Acetabulums vor. Dies entspricht dem Gebiet, in dem bei der Flexion und Innenrotation die stärksten Spannungskräfte auftreten^{17,18}.

2.1.2 Therapie

Eine rein konservative Therapie mit antiinflammatorischen Medikamenten und Physiotherapie und einer Reduktion des Sportpensums kommt nur bei geringgradigen Beschwerden in Frage. Die anatomischen Gegebenheiten lassen sich dadurch nicht korrigieren.

Chirurgisch gibt es verschiedene Möglichkeiten, die dem Grad der Veränderungen und der Art des Impingements angepasst werden müssen. Operative Therapien sollen die Hüftgelenksmobilität verbessern und entstandene Schäden reparieren. Eine Definition, die im Zusammenhang mit dem Cam-Impingement wichtig ist, ist das femorale Offset. Es beschreibt die Distanz vom Rotationszentrum des Femurkopfes zu einer Linie durch die Längsachse des Femurs¹⁹. Eine Verbesserung der Hüftgelenksmobilität wird im Falle eines Cam-Impingement durch die Rekonturierung des Offsets erreicht^{5,20}. Hierbei trägt man schichtweise die unrunden Anteile des Femurkopfes ab. Beim Pincer-Impingement wird dies, je nach Problemstellung, durch eine periacetabuläre Osteotomie (PAO) oder durch eine Osteochondroplastik erreicht²¹.

Eine gefürchtete Komplikation, die bei einer Operation des FAI auftreten kann ist eine Verletzung der A. circumflexa femoris medialis (ACFM). Dadurch kann es zu einer avaskulären Femurkopfnekrose kommen⁸⁻¹⁰.

2.1.2.1 Arthroskopie

Ein grosser Vorteil der arthroskopischen Therapie ist die kurze Rekonvaleszenzzeit mit einer schnellen Wiederbelastbarkeit des operierten Beines. Diese Methode hat aber den Nachteil, dass sie keinen Zugang zum gesamten Hüftgelenk gewährt. Schäden, die im Bereich von posterior über superior nach anterior liegen können dagegen gut behandelt werden, beispielsweise durch eine Osteochondroplastik des Kopfhalsübergangs. Das Trimmen des Acetabulumrandes mit einer Refixation des Labrums ist technisch anspruchsvoller. Bei weiter posterior/superior gelegenen Veränderungen eines Pincer-Impingements ist eine präzise arthroskopische Therapie schwierig und eine Behandlung mit chirurgischer Luxation der Hüfte erfolgversprechender²². Bei der arthroskopischen Behandlung des Cam-Impingement konnten vergleichbare Ergebnisse wie bei der Behandlung mit der offenen Hüftluxation nach Ganz erzielt werden²⁰.

2.1.2.2 Operation mit Luxation der Hüfte

Der (nicht-arthroskopische) operative Zugang mit Luxation der Hüfte und Trochanterosteotomie nach Ganz erlaubt eine vollständige Übersicht über das Gelenk und das Ausmass der Erkrankung²³. Weitere chirurgische Therapien wie eine Fixierung des Labrums sowie ein Trimmen des Acetabulumrandes sind so in vollem Umfang möglich, dies entspricht dem „Goldstandard“ der FAI Therapie.

Durch Untersuchungen über den Verlauf der ACFM konnte ein Zugang entwickelt werden, bei dem die den Femurkopf versorgenden Gefässe geschont werden und damit eine avaskuläre Femurkopfnekrose (AVN) verhindert wird^{8,23}.

2.1.3 Radiologische Darstellung des FAI

Wenn durch konventionelle Röntgenaufnahmen der Verdacht eines Impingements geäussert wird, gilt das MRI, insbesondere die dGEMRIC-Sequenz (delayed gadolinium enhanced MRI of cartilage) als „Gold Standard“ zur Diagnose des FAI. Knorpelschäden können sichtbar gemacht werden und die frühzeitige Beurteilung einer Knorpeldegeneration wird möglich²⁴.

Gegenstand aktueller Forschung ist, wie exakt die Knorpelläsionen im MRI dargestellt werden können und wann das Stadium erreicht ist, indem eine chirurgische Korrektur

des Impingements medizinisch keinen Sinn mehr hat. Diese Beurteilung ist nur möglich, wenn an einem Tiermodell MRI-Befunde mit einer histologischen Auswertung der Knorpelschäden verglichen werden können. An diesem Tiermodell müssen nicht nur die durch das Impingement entstanden Knorpelschäden reproduziert werden können, sondern es muss zudem möglich sein, Off-Set Korrekturen zu verschiedenen Zeitpunkten nach der FAI Induktion durchzuführen. So kann der Effekt der Korrektur radiologisch und histologisch beurteilt und verglichen werden.

2.2 Risiken der Off-Set Korrektur

Eine Verletzung der ACFM und eine daraus resultierende AVN ist ein gefürchtetes Risiko der Off-Set Korrektur. Beim Menschen wurde durch verschiedene Studien der Verlauf der den Femurkopf versorgenden Gefäße herausgefunden. Dadurch konnte das Risiko einer iatrogenen AVN erheblich minimiert werden. Beim Schaf dagegen finden sich nur sehr wenige Informationen zur Blutversorgung des Femurkopfes.

2.2.1 Avaskuläre Femurkopfnekrose

Das Bild der AVN wird durch das Absterben von Osteozyten und Knochenmark charakterisiert. Dieses Absterben wird durch eine ungenügende Blutversorgung des subchondralen Knochens verursacht, die traumatisch oder nichttraumatisch bedingt sein kann. Die vollständige Pathophysiologie der nichttraumatischen AVN ist noch nicht ganz geklärt. Meist ist es jedoch ein multifaktorielles Geschehen. Bei der posttraumatischen AVN ist die Ursache eine Verletzung der femurkopfversorgenden Blutgefäße durch z.B. Ruptur oder Quetschung.

Die Klassifikation nach Ficat und Arlet²⁵ wurde schon früh zur Beurteilung einer AVN verwendet²⁶. Mit der Entwicklung weiterer radiologischer Möglichkeiten, vor allem des MRI wird heute im europäischen Raum hauptsächlich die Einteilung nach ARCO (Association Research Circulation Osseous)²⁷ gebraucht (siehe Tabelle 2).

2.2.2 MRI zur Detektion einer AVN

Das MRI ist sehr sensitiv in der Darstellung einer frühen AVN und stellt damit die genaueste diagnostische Methode dar. Es ist die Methode der Wahl für eine präzise Diagnose und Einstufung der Erkrankung^{28,29}.

Im T1 gewichteten MRI stellt sich der normale Femurkopf als signalstark dar³⁰. Diese hohe Signalstärke kommt durch das wasserstoffreiche Fett des Knochenmarks zustande²⁸. Die Markhöhle wird von einer sehr scharf begrenzten Kortex umgeben, die

sich ähnlich signalarm darstellt wie die als gekrümmte querverlaufende Linie sichtbare Epiphysenfuge und die zentralen gewichtstragenden Trabekel, die vertikal als breites Band verlaufen³⁰.

Das Kennzeichen für eine AVN ist eine Verringerung der Signalintensität unterhalb des Gelenkes²⁸. Diese niedrigere Signalintensität rührt von der Tatsache her, dass das fetthaltige Knochenmark durch fibrotisches Gewebe ersetzt wird und dieses eine verlängerte T1 Zeit hat³⁰. In einer T1 gewichteten Sequenz sind „bandartige“ Läsionen, die mit niedriger Signalstärke dargestellt werden pathognomonisch für eine AVN³¹.

2.3 Die Blutversorgung des Femurkopfes beim Menschen

Die Retinakulargefäße stellen die arterielle Hauptversorgung des Femurkopfes beim Menschen dar³². 1949 wurden von Tucker et al. drei Hauptgruppen von retinakulären Gefäßen beschrieben, wobei die postero – superior und die postero – inferioren der A. circumflexa medialis und die anterior verlaufenden der A. circumflexa femoris lateralis zugeordnet werden konnten³². Eine komplette Blutversorgung des Femurkopfes kann durch die superioren Retinakulargefäße alleine gewährleistet werden⁹. Die Epiphyse wird nur wenig bis gar nicht von der A. circumflexa femoris lateralis (ACFL) versorgt^{8,33}. Die superioren Retinakulargefäße alleine können eine Blutversorgung des Femurkopfes sichern⁹. Dadurch ist der tiefe Ast der A. circumflexa femoris medialis hauptsächlich für die Blutversorgung des Femurkopfes verantwortlich. Diese entspringt beim Menschen in den meisten Fällen aus der A. profunda femoris. Die ACFM (A. circumflexa femoris medialis) kommt von anterior, zieht dann zwischen dem Femur und dem Becken nach posterior und versorgt von hier aus den Femurkopf. Die ACFM verläuft dabei von anterior zwischen dem M. iliopsoas und dem M. pectineus hindurch und zieht am inferioren Rand des M. obturator externus nach posterior (siehe Abbildung 3).

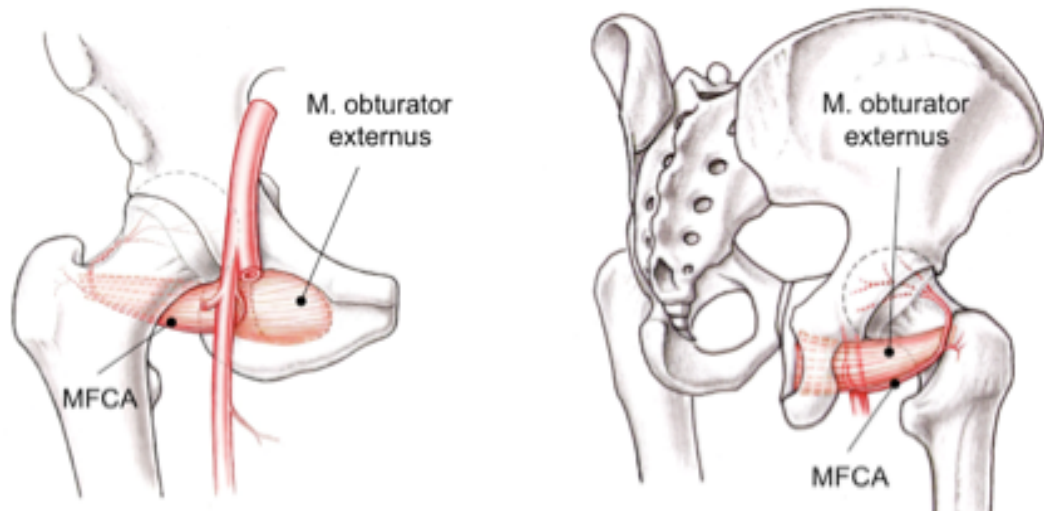


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Verlaufs der A. circumflexa femoris medialis des Menschen (Anteriolateralansicht und Posteriolateralansicht). (mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. med. Moritz Tannast, Inselspital Bern, Schweiz)

Von posterior kommend zieht sie dann, den M. obturatorius externus überquerend, in Richtung des intertrochantären Kamms des Femurs. Hier gibt sie ihren Trochanterast ab, zieht weiter zwischen dem M. gemellus superficialis und M. piriformis in die Hüftgelenkscapsel ein und entlässt etwa vier bis fünf retinakuläre Gefässe. Der posteriore Anteil des Femurhalses bleibt hierbei frei von kopfernährenden Gefässen⁸ (siehe Abbildung 4).

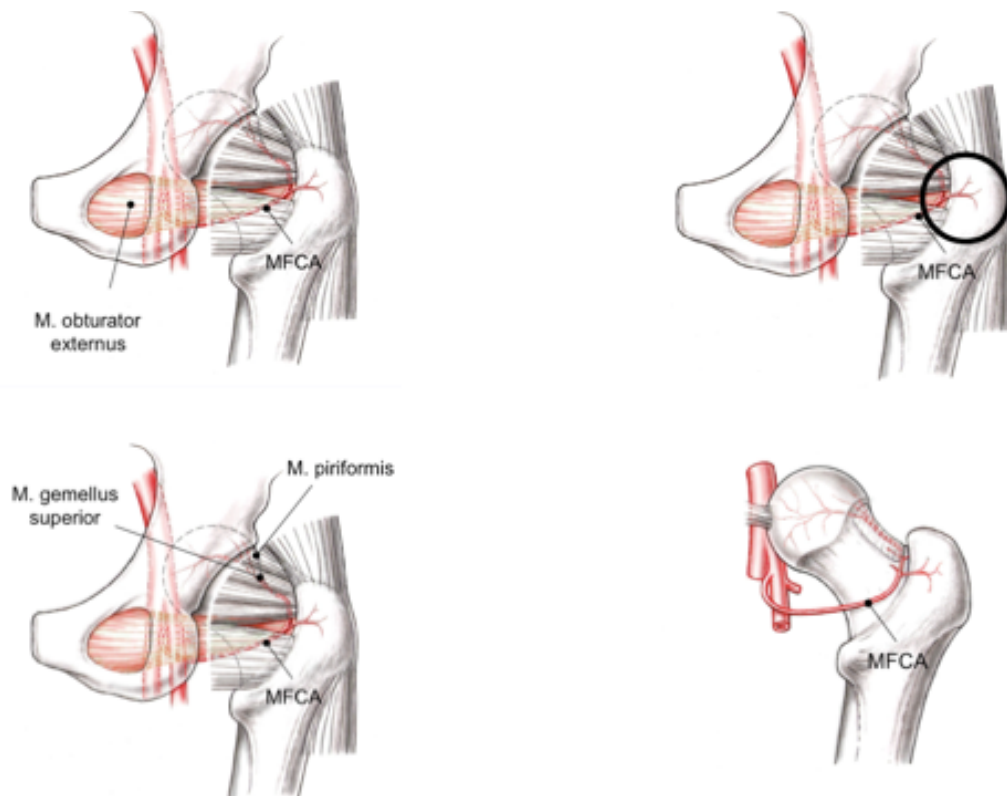


Abbildung 4: Posteriore Ansicht: Schematischer Verlauf der A. circumflexa femoris medialis des Menschen (mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. med. Moritz Tannast, Inselspital Bern, Schweiz)

2.4 Das Schaf als Tiermodell

2.4.1 Lagebezeichnungen Mensch-Schaf

In Bezug auf die anatomischen Lagebezeichnungen wird in der Humanmedizin häufig von anterior für ventral, posterior für dorsal, superior für kranial und inferior für kaudal gesprochen. In der Tiermedizin werden diese Bezeichnungen im Allgemeinen nicht verwendet.

2.4.2 Impingement Induktion

Das Schaf ist ein etabliertes Tiermodell für das Cam-Typ Impingement¹¹. Durch die Umstellungsosteotomie des Femurs können die gleichen Schäden induziert werden, die beim menschlichen FAI vom Cam-Typ entstehen. Der Femurkopf des Schafes hat von Natur aus eine unrunde Form, welche der Morphologie des humanen Femurkopfes beim FAI ähnelt (siehe Abbildung 5).

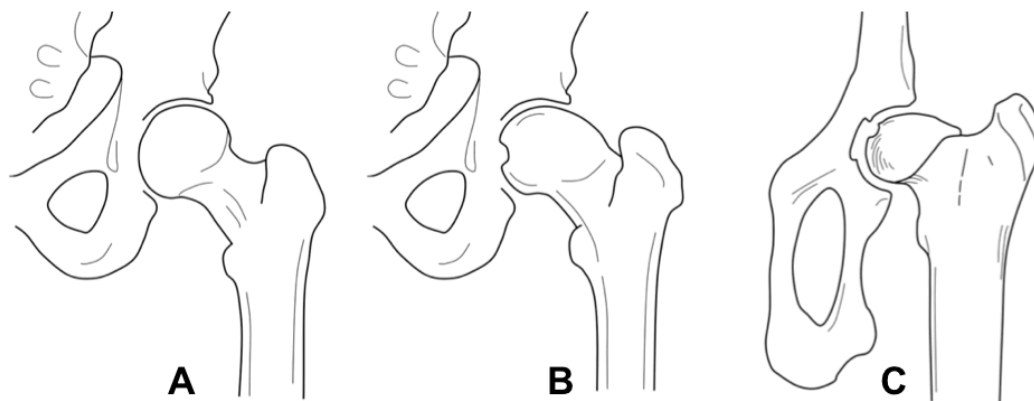


Abbildung 5: Schematische Darstellung von Hüftgelenken: A: Mensch ohne Deformation (Ansicht von posterior), B: Mensch mit Deformation vom Cam-Typ (posteriore Ansicht), C: Schaf ohne Deformation (kaudale Ansicht) (mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. med. Moritz Tannast, Inselspital Bern, Schweiz)

Durch eine zuklappende, intertrochantäre Varusosteotomie kann der unrunde Femurkopfanteil noch weiter in Richtung der Hauptbelastungszone rotiert werden, wodurch ein Impingement entsteht¹¹ (siehe Abbildung 6).

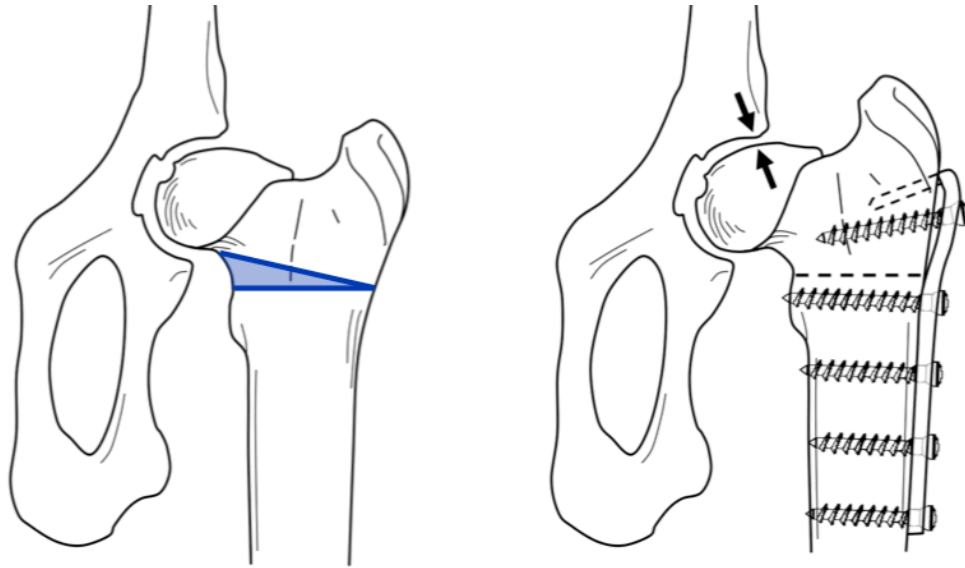


Abbildung 6: Kaudale Ansicht: Schematische Darstellung einer Varisationsosteotomie zur Induktion eines Impingements vom Cam-Typ beim Schaf (mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. med. Moritz Tannast, Inselspital Bern, Schweiz)

2.4.3 Übertragbarkeit des Tiermodells

Das durch die Varisationsosteotomie induzierte Cam–Impingement beim Schaf verursacht hauptsächlich Knorpelläsionen posterior-superior bzw. dorsokaudal am Acetabulum und superior bzw. dorsal am Femurkopf¹¹. Beim Menschen hingegen liegen die Veränderungen hauptsächlich anterior-superior am Acetabulum^{5,15,17}. Die unterschiedlichen Lokalisationen im Acetabulum sind mit dem aufrechten Gang des Menschen im Gegensatz zum vierfüssigen Gang des Schafes zu erklären¹¹. Beim Mensch wie beim Schaf entspricht die Lokalisation der acetabulären Läsionen jeweils der Stelle, an der die meisten Scherkräfte einwirken. Diese Veränderungen stimmen weitgehend mit denen beim Menschen überein, auch wenn der vierfüssige Gang des Schafes eine andere Orientierung der Hüfte bedingt. Mechanische Knorpelparameter wie Elastizitätsmoduln und Permeabilität sind bei Mensch und Schaf vergleichbar³⁴. Auch die Richtung und das zeitabhängige Entstehen der Hüftgelenkkräfte sowie die Extensions- und Flexionswinkel der Hüfte während des Gehens sind bei Schaf und Mensch ähnlich³⁵⁻³⁷. Govoni, Rahal et al. haben eine durchschnittliche Flexion von 54°, eine Extension von 143° und einen range-of-motion von 89° in der Schafhüfte gemessen³⁸.

Auch hinsichtlich der Lastverteilung im Gelenk besteht diese Ähnlichkeit. Trotz der unterschiedlichen Anatomie haben Mensch und Schaf einen vergleichbaren

Kontaktdruck, eine ähnliche mittlere Oberflächenspannung ihrer Beckenknochen³⁹ bei einem ähnlichen Skelettstoffwechsel⁴⁰. Degenerative Prozesse in Gelenken laufen beim Schaf jedoch deutlich schneller ab als beim Menschen (Monate anstelle von Jahren: „Zeitraffereffekt“)¹¹. Im Gegensatz zum Hund und zum Menschen besteht beim mittelalten Schaf keine Prädisposition für eine spontane, nicht infektiöse Coxarthrose⁴¹. Es wird aber vermutet, dass alte Schafe zumindest eine subklinische Osteoarthritis entwickeln können⁴².

Die Bewegung des Schafes verläuft fast nur über Extension und Flexion, es findet fast keine Rotation und nur sehr wenig Adduktion und Abduktion statt. Damit ist der Bewegungsumfang des Schafes sehr gut vorhersehbar und gut in einer Studie kalkulierbar. Soweit eignet sich das Schaf gut für die weiteren Fragestellungen der FAI Forschung.

2.5 Die Anatomie der Schafhüfte

2.5.1 Knochen und Knorpel

Durch seinen vierfüssigen Gang hat das knöcherne Becken des Schafes eine andere Orientierung als das des Menschen (siehe Abbildung 7).

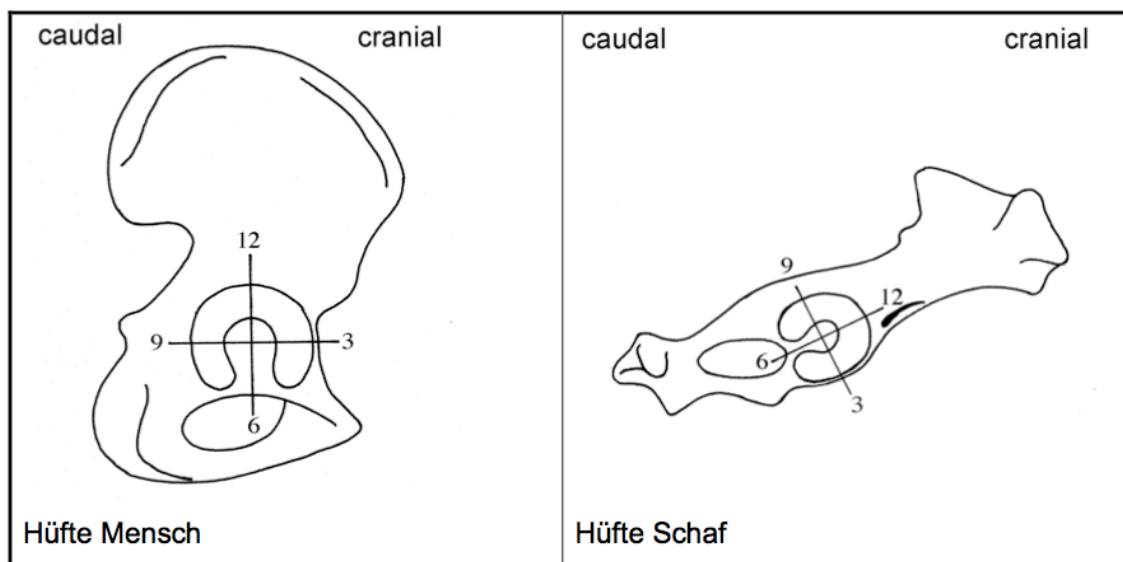


Abbildung 7: Vergleich der Hüfte vom Menschen und Schaf. Aus: „Fiechter RM-E: Am Schafmodell reproduziertes Femoroacetabuläres Impingement, häufigste Ursache der frühen Osteoarthritis beim nichtdysplastischen Hüftgelenk des Menschen. Zürich, 2005“¹

Die Knorpelschicht im Schafacetabulum ist hufeisenförmig. Es besitzt eine zentrale Fossa und hat ein ringsum verlaufendes Labrum, vergleichbar mit dem Menschen^{43,44}.

2.5.2 Muskeln

Der M. gluteus superficialis entspricht dem M. gluteus maximus des Menschen⁴⁵. Beim Schaf ist der M. gluteus superficialis teilweise mit dem M. biceps femoris verwachsen und wird deshalb als M. gluteobiceps bezeichnet. Der M. gluteus medius hat seinen Ursprung an den Darmbeinflügeln und setzt am Trochanter major an (siehe Abbildung 8). In der Tiefe unter dem M. gluteus medius liegt der M. gluteus accessorius, ein sehniger Muskel, der beim Schaf besonders kräftig entwickelt ist (siehe Abbildung 9). Der M. gluteus profundus ist beim Schaf relativ stark entwickelt. Er hat seinen Ursprung an der Spina ischiadica und am breiten Beckenband. Er zieht in der Tiefe direkt über das Hüftgelenk und inseriert kraniallateral am Femur^{45,46}. Der gluteus profundus entspricht beim Menschen dem M. gluteus minimus⁴⁷.

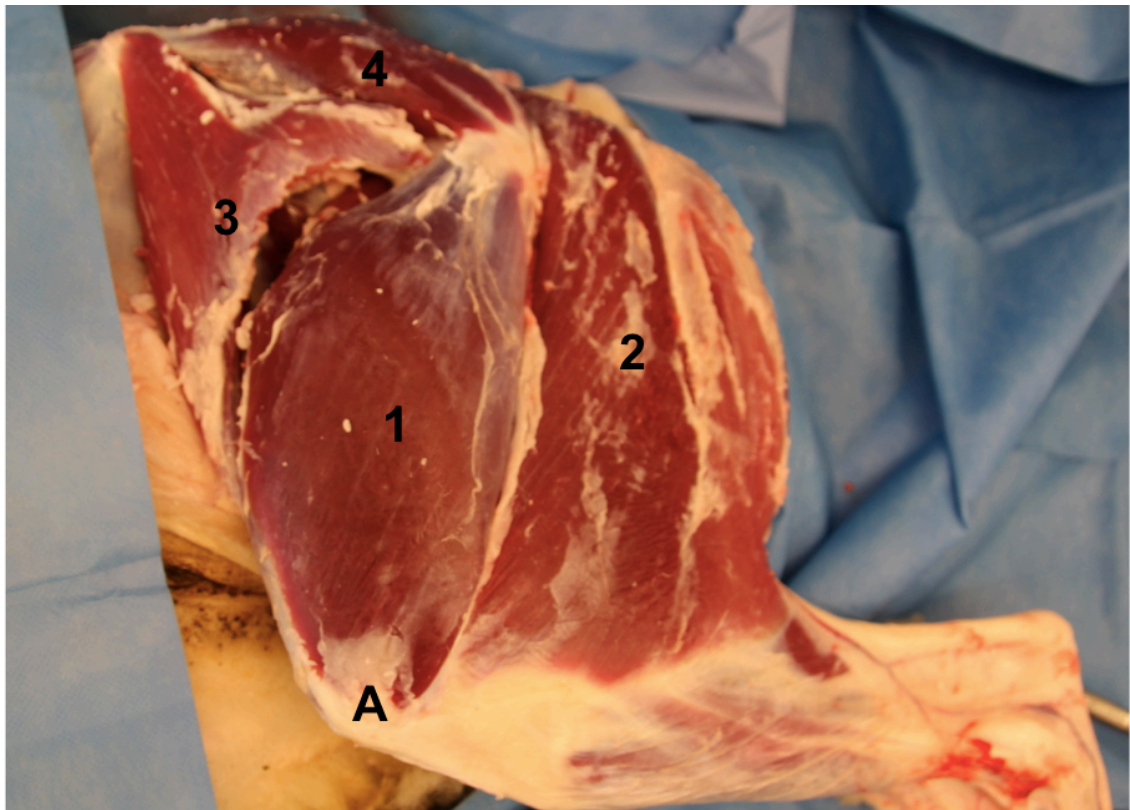


Abbildung 8: Präparat der oberflächlichen Muskulatur der linken Beckengliedmasse des Schafes (Lateralansicht). A: Knie, 1: M. vastus lateralis de M. quadriceps femoris, 2: M. biceps femoris, 3: M. tensor fascia latae, 4: M. gluteus medius

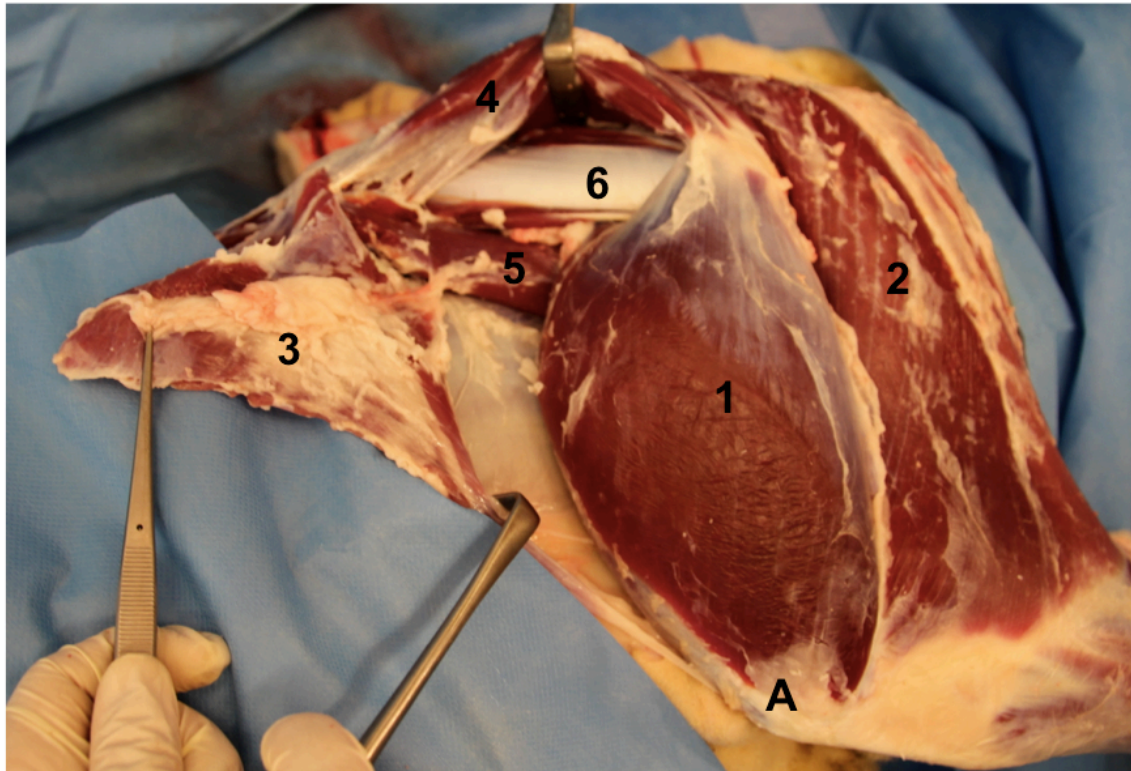


Abbildung 9: Präparat der oberflächlichen Muskulatur der linken Beckengliedmasse des Schafes (Lateralansicht). A: Knie, 1: M. vastus lateralis des M. quadriceps femoris, 2: M. biceps femoris, 3: M. tensor fascia latae (nach kranial geklappt), 4: M. gluteus medius (nach dorsal retrahiert), 5: M. iliacus, 6: M. gluteus profundus

Der M. sartorius ist ein einheitlicher Muskel mit zwei Ursprungsköpfen (s. Abbildung 10). Diese entspringen an der Fascia iliaca sowie der Endsehne des M. psoas minor und der Eminentia iliopubica. Dieser Muskel umfasst mit seinen beiden Anteilen die A. femoralis. Die Endaponeurose des M. gracilis verschmilzt mit der des M. sartorius und setzt an der Fascia cruris an^{45,46}.

1. *M. gluteus medius* – mittlerer Kruppenmuskel
2. *M. gluteobiceps* – zweiköpfiger Kruppenmuskel
3. *Pars intrapelvina m. obturatorii externi* – im Becken gelegener Teil des äußeren Verstopfermuskels
4. *M. levator ani* – Afterheber
5. *Portio medialis m. iliaci* – mediale Portion des Darmbeinmuskels
6. *M. psoas major* – großer Lendenmuskel
7. *Portio lateralis m. iliaci* – laterale Portion des Darmbeinmuskels
8. *M. psoas minor* – kleiner Lendenmuskel
9. *M. quadratus lumborum* – viereckiger Lendenmuskel
10. *M. tensor fasciae latae* – Spanner der Oberschenkelfaszie
- 10'. *Fascia lata femoris* – Oberschenkelfaszie
11. *M. sartorius* – Schneidermuskel
- 11'. *Portio cranialis m. sartorii* – kraniale Portion des Schneidermuskels
- 11''. *Portio caudalis m. sartorii* – kaudale Portion des Schneidermuskels
12. *M. rectus femoris* – gerader Oberschenkelmuskel
13. *M. vastus medialis* – medialer Oberschenkelmuskel
14. *M. pectineus* – Kammuskel
15. *M. gracilis* – schlanker Schenkelmuskel
- 15'. *Insertio m. gracilis* – Ansatz des schlanken Schenkelmuskels
16. *M. adductor* – Einwärtszieher
17. *M. semimembranosus* – halbhäutiger Muskel
18. *M. semitendinosus* – halbsehniger Muskel

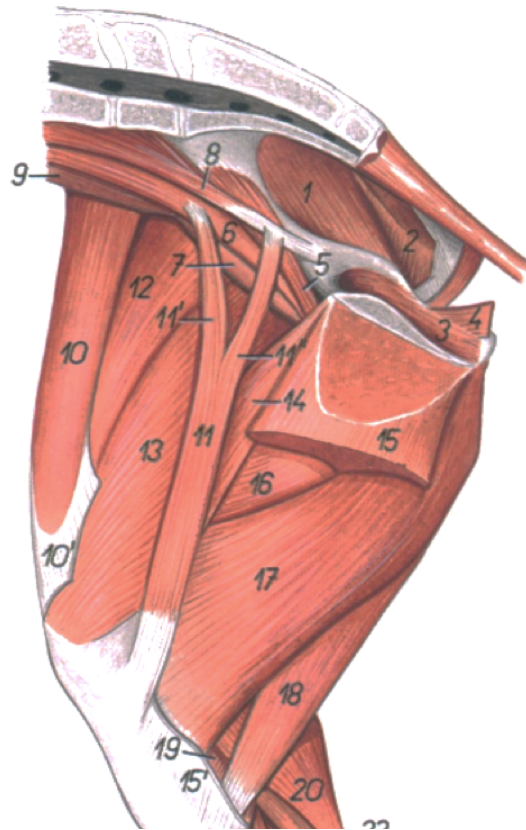


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Beckenmuskulatur eines Schafes von medial; aus: „Popesko, P., Atlas der topographischen Anatomie der Haustiere, Stuttgart: Enke, 1993“⁴⁸

Beim Schaf gibt es keinen *M. obturatorius internus*. Der *M. obturatorius externus* besitzt eine *Pars intrapelvina*. Diese entspringt innen am Sitzbein und zieht mit ihrer Sehne durch das Foramen obturatorium zur Fossa trochanterica. Der restliche Anteil des *M. obturatorius externus* hat seinen Ursprung an der Unterseite des Beckens in der Umgebung des Foramen obturatorium und zieht auch zur Fossa trochanterica. In der Fossa trochanterica heften sich ausser dem *M. obturatorius externus* auch noch die *Mm. gemelli* und der *M. quadratus femoris* an. Die *Mm. gemelli* sind beim Schaf zu einem Muskel verschmolzen. Dieser hat seinen Ursprung kaudal des Acetabulums am Seitenrand des Sitzbeins und seinen Ansatz in der Fossa trochanterica. Ein *M. articularis coxae* existiert beim Schaf nicht⁴⁵.

Der *M. quadratus femoris* hat seinen Ursprung ventral am Sitzbein, in der Nähe des Tuber ischiadicum und seinen Ansatz kaudal am Os femoris, distal der Fossa trochanterica⁴⁵.

2.5.3 Gefäße

Die A. iliaca externa sinistra verlässt beim Schaf auf Höhe des 6. Lendenwirbels (L) die Aorta abdominalis als starkes Gefäß. Im Gegensatz zum Menschen gibt es beim Schaf keine A. iliaca communis⁴⁹. Dafür gibt es beim Schaf einen Grundstamm, aus dem die rechte A. iliaca externa sowie ein gemeinsamer Stamm für die A. iliaca interna entspringen⁴⁹. Als erstes entlässt sie die A. circumflexa ilium profunda und vor dem Eintritt in den Schenkelkanal die A. profunda femoris. Bei dem Eintritt in den Schenkelkanal wird die A. iliaca externa zur A. femoralis. Die A. circumflexa ilium profunda teilt sich in einen R. cranialis und einen R. caudalis.

Die A. profunda femoris wird zur A. circumflexa femoris medialis mit ihren Rr. acetabularis, oburatorius, profundus, ascendens und transversus.

Die A. circumflexa ilium profunda entspringt beim Schaf wie bei den meisten Haussäugetieren aus der A. iliaca externa⁵⁰.

Die A. abdominalis caudalis entspringt beim Schaf aus der A. profunda femoris gelegentlich auch aus dem Truncus pudendoepigastricus. Als schwaches Gefäß verläuft sie kranioventral medial des M. obliquus internus abdominis später dann in diesem Muskel und parallel zum lateralen Rand des M. rectus abdominis. Sie gibt Äste an den M. obliquus externus abdominis ab⁵⁰.

Die A. iliaca externa entlässt, kurz bevor sie durch die Lacuna vasorum zieht, die A. profunda femoris. Diese entlässt ihrerseits vor dem Eintritt in die Lacuna vasorum den Truncus pudendoepigastricus. Danach zieht sie in kaudaler Richtung durch die Lacuna vasorum und dann lateroventral der Eminentia iliopubia zwischen dem M. iliopsoas und dem M. pectineus. In kaudodistaler Richtung zieht sie bis zu den Mm. adductores und entlässt hier die A. circumflexa medialis⁵⁰.

Nach dem Durchtritt durch die Lacuna vasorum läuft die A. iliaca externa als A. femoralis weiter. Beim Schaf wie bei allen Wiederkäuern und beim Schwein zieht die A. femoralis zwischen den Ursprungsschenkeln des M. sartorius hindurch und verläuft auf der Lateralseite des M. sartorius. Kurz nachdem sie nach durch die Ursprungsschenkel hindurch gezogen ist, entlässt sie nach lateral die A. circumflexa femoralis lateralis.⁴⁵

Im weiteren Verlauf Richtung distal überkreuzt sie das Os femoris medial, wird dabei vom M. vastus medialis unterlagert und zieht dann in die Kniekehle, wo sie zur A. poplitea wird. Am Ende des Schenkelkanals entlässt die A. femoralis nach medial die

A. saphena. Kurz darauf entlässt die A. femoralis in Richtung kaudal drei starke Muskeläste, die Aa. caudales femoris.

Die vaskuläre Versorgung des Femurkopfes beim Schaf wird in der Literatur nicht genau beschrieben⁵⁰⁻⁵². Es werden die drei Rami der ACFL genannt, von denen der R. ascendens Zweige für den Hüfthöcker, das Os femoris sowie das Hüftgelenk entlässt. An welchen Anteil des Hüftgelenks wird nicht erwähnt. Auch bei der Beschreibung der ACFM ist die Literatur bisher sehr vage. Es wird zwar die Aufteilung in die fünf Rami beschrieben, aber nur Zweigen des R. acetabularis werden eine Blutversorgung des Hüftgelenks zugeschrieben. Auch hier fehlt eine genauere Beschreibung der Lokalisation⁵⁰.

2.6 Problemstellung

Um noch offene Fragen zum FAI beantworten zu können, muss beim Tiermodell Schaf eine Off-Set Korrektur durchgeführt werden. Die Lokalisation an welcher die Korrektur durchgeführt wird, liegt beim Schaf dorsal am Übergang von Femurhals zu Femurkopf. Die kopfernährenden Blutgefäße beim Menschen liegen superior. Falls die Gefäße des Schafes gleich verlaufen wie die des Menschen, würden man mit einer Off-Set Korrektur die vermutlich auch beim Schaf kopfernährenden Gefäße beschädigen und so eine avaskuläre Femurkopfnekrose verursachen.

Diese Arbeit soll die arterielle Blutversorgung des Hüftgelenkes, insbesondere den Verlauf der ACFM und ACFL am Femurkopf des Schafes zeigen und klären, ob eine Off-Set Korrektur ohne das Risiko einer AVN durchgeführt werden kann.

3 Material und Methoden

3.1 Aufbau der Studie

Diese anatomische Studie gliedert sich in fünf Teilstudien von der zwei Studien in vivo und drei post mortem durchgeführt wurden.

Im ersten Teil wurde bei 15 adulten weiblichen Schweizer Alpenschafen eine computertomographische Angiographie (CTA-Gruppe) durchgeführt, um eine Übersicht über den Verlauf der Femurkopf-Gefässe zu bekommen und um die Variabilität der Gefässaufzweigungen zu beurteilen.

Im zweiten Teil wurden bei drei euthanasierten Schafen die Arterien der Beckengliedmassen über die Aorta abdominalis mit Silikon gefüllt und anschliessend präpariert, um den Gefässverlauf darzustellen.

Im dritten Teil wurden von drei euthanasierten Schafen Korrosionspräparate angefertigt, um eine Replik des arteriellen Gefässbaums zu erhalten und diese als dreidimensionales Modell zu nutzen.

Im vierten Teil wurden 22 Femora von 11 Schafen mazeriert und sowohl Lage als auch Anzahl der vaskulären Foramina im Übergang von Femurkopf zu Femurhals beurteilt.

Zum Schluss wurde überprüft, ob eine Off-Set Korrektur am Femur des Schafes durchgeführt werden kann, ohne eine avaskuläre Femurkopfnekrose zu induzieren. Hierfür wurden aus der CT-Schafgruppe zehn Tiere einer FAI Induktionsoperation unterzogen (siehe Tabelle 1). Bei neun Schafen wurde eine Off Set Korrektur durchgeführt. Nach unterschiedlichen Überlebenszeiten und unterschiedlichen Zeitabständen zwischen der Induktionsoperation und der Korrektur wurden die Schafe euthanasiert und mit dem Magnetresonanztomographen (MRI) untersucht.

ID	Durchgeführte Massnahmen			
36.01	CTA			
36.02	CTA			
36.03	CTA			
36.04	CTA	Varisationsosteotomie	Off-Set Korrektur	MRI
36.05	CTA	Varisationsosteotomie	Off-Set Korrektur	MRI
36.06	CTA	Varisationsosteotomie	Off-Set Korrektur	MRI
36.07	CTA	Varisationsosteotomie		MRI
36.08	CTA	Varisationsosteotomie	Off-Set Korrektur	MRI
36.09	CTA	Varisationsosteotomie	Off-Set Korrektur	MRI
36.10	CTA	Varisationsosteotomie	Off-Set Korrektur	MRI
36.11	CTA	Varisationsosteotomie	Off-Set Korrektur	MRI
36.12	CTA	Varisationsosteotomie	Off-Set Korrektur	MRI
36.13	CTA			
36.14	CTA	Varisationsosteotomie	Off-Set Korrektur	MRI
36.15	CTA			

Tabelle 1: Die Schafe der in-vivo Teilstudien und die an ihnen durchgeführten Massnahmen (ID = Identifikationsnummer des Schafs; CTA = computertomographische Angiographie; MRI = Mangnetresonanztomographie)

3.2 Schafmanagement

Die für diese Studie verwendeten Tiere stammten aus einer institutseigenen Herde, deren Tiere bei Ankauf und in regelmässigen Abständen einem Gesundheitscheck unterzogen wurden. Kranke Tiere und Tiere mit reduziertem Allgemeinbefinden wurden nicht verwendet.

Die Tiere wurden zweimal jährlich geschoren und alle sechs bis acht Wochen wurden die Klauen geschnitten sowie das Allgemeinbefinden kontrolliert.

Es wurden regelmässig Sammelkotproben für parasitologische Untersuchungen genommen. Je nach Wurmbefall und Resistenzlage wurden die Schafe mit Doramectin (Dectomax®, Provet AG, Lyssach, Schweiz), Levamisol-Triclabendazol (Endex®, Novartis Tiergesundheit AG, Basel, Schweiz), Netobimin (Hapadex®, MSD Animal Health GmbH, Luzern, Schweiz) oder Monepantel (Zolvix®, Novartis Tiergesundheit AG, Basel, Schweiz) entwurmt.

3.3 Teilstudien

Die in vivo-Versuche im Rahmen dieser Studie wurde vom kantonalen Veterinäramt bewilligt (Bewilligungsnummer 02/2014). 10 Schafe wurden einer einseitigen Varisationsosteotomie unterzogen um ein Cam-Impingement zu induzieren (s. Abbildung 6). Nach 69 bis 140 Tagen wurde eine Off-Set Korrektur durchgeführt. Nach einer weiteren Überlebensdauer von ca. 140 Tagen wurden die Schafe euthanasiert und die Hüftgelenke mit dem umliegenden Gewebe mit dem MRI untersucht. Anschliessend wurden Proben aus dem Hüftgelenk für die histologische Untersuchung gewonnen. Die histologischen Untersuchungen sowie weitere radiologischen Untersuchungen waren Teil einer anderen Arbeit. Vor der ersten Operation wurden von allen Tieren Röntgenbilder und angiographische Computertomographien angefertigt. Postoperativ wurden nochmals Röntgenbilder zur Überprüfung der Osteosynthese angefertigt. Ein Tier erhielt keine Korrektur und diente als Kontrolle. Nach der Euthanasie wurden die Implantate entfernt und es wurde eine CT Untersuchung und eine MRI Untersuchung durchgeführt (siehe Tabelle 1).

3.4 Angiographische Computertomographie (CTA)

Es wurde von 15 gesunden weiblichen Schafen CTA angefertigt. Das Alter der Schafe lag zwischen 1.4 Jahren und 3.4 Jahren. Vor der Anästhesie wurde ihnen für 24 Stunden das Futter entzogen. Wasser stand durchgehend ad libitum zur Verfügung.

Die Schafe wurden routinemässig präanästhetisch untersucht und etwa 30 Minuten vor Einleitung der Anästhesie mit Buprenorphin (0.01mg/kg i.m., Temgesic®, Reckitt Benckiser AG, Wallisellen, Schweiz) und Xylazin (0.1mg/kg i.m., Xylazin Streuli, Streuli Pharma AG, Uznach, Schweiz) oder mit Butorphanol (0.2-0.4 mg/kg) und Midazolam (0.1-0.2 mg/kg) intramuskulär prämediziert. Nach dem Ausrasieren, Reinigen und Desinfizieren der Haut wurde ein Venenverweilkatheter (BD Angiocath, 2,1x83 mm) in die V. jugularis gelegt. Mit einer Kombination aus Diazepam (0,1mg/kg, i.v., Valium®, Roche Pharma AG, Reinach, Schweiz), Ketamin (3-5mg/kg i.v., Narketan 10®, Vetoquinol AG, Ittigen, Schweiz) und Propofol (0.4-0.6 mg/kg, i.v., Propofol® 1% Fresenius, Fresenius Kabi AG Stans, Schweiz) oder Methadon (0.2mg/kg i.m., Methadon Streuli, Streuli Pharma AG Uznach, Schweiz), Ketamin (3-5mg/kg i.v., Narketan 10®, Vetoquinol AG, Ittigen, Schweiz) und Propofol (0.4-0.6 mg/kg, i.v., Propofol® 1% Fresenius, Fresenius Kabi AG Stans, Schweiz) erfolgte die Einleitung der Anästhesie. Während der CT-Untersuchung wurde die Anästhesie durch

eine Inhalationsanästhesie mit 1-2 Vol% Isofluran, (Attane Isoflurane ad us. vet., MINRAD INC., Buffalo, NY, USA) in 2l Sauerstoff pro Minute aufrechterhalten.

Die Schafe wurden auf dem Rücken in eine Schaumstoffwanne gelagert und mit gestreckten Beinen voraus am CT- Tisch fixiert. Alle Aufnahmen wurden mit dem Somaton Sensation Open Scanner von Siemens, Erlangen, Deutschland mit einer Röhrenspannung von 120 kV und einer Stromstärke von 300mAs angefertigt. Weitere Scanparameter waren pitch: 0.65, Rotationszeit: 1.0 s, Rekon Increment: 3.0 mm. Als Weichteilfenster wurde B20 und als Knochenfenster B60 gewählt. Als Kontrastmittel wurde Iopromidum (2.0-2.1 ml/kg i.v, Ultravist-370®, Bayer AG, Schweiz, i.v.) verabreicht. Zur Bearbeitung und Auswertung der DICOM Dateien wurde die OsiriX Software 5.7.1 64 bit und OsiriX Lite verwendet. Durch ein dreidimensionales Volumenrendering (3DVR) wurde eine erste räumliche Orientierung geschaffen. Es wurde von jedem untersuchten Schaf ein Screenshot von der 3DVR Darstellung von ventral aufgenommen und als Bilddatei dokumentiert (siehe Abbildung 11).

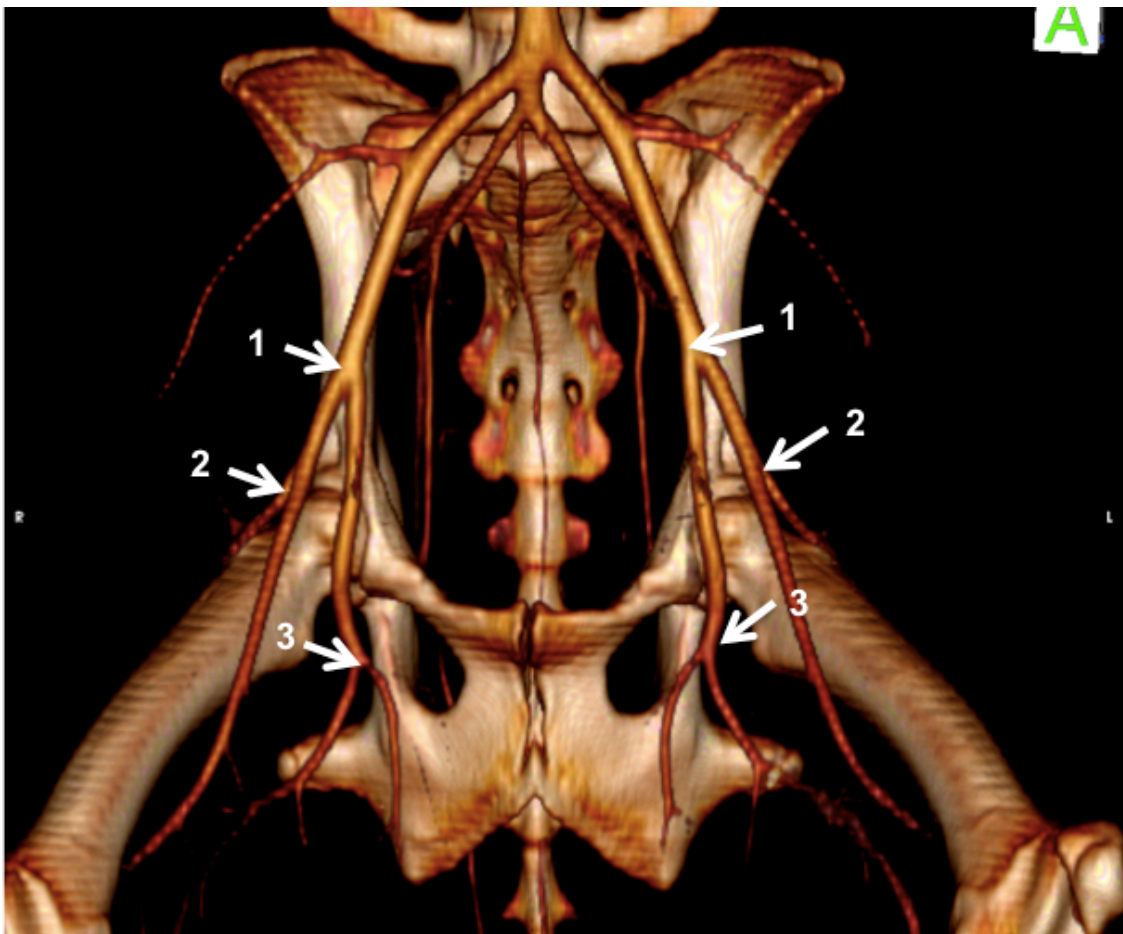


Abbildung 11: Ventrale Ansicht einer CT-Aufnahme im 3D Volumen Rendering Modus (3DVR), hierbei wird eine dreidimensional erscheinende Aufnahme aus einer 2D Aufnahme modelliert. Die weissen Pfeile markieren die grossen arteriellen Gefässabzweigungen. 1 Abgang der A. profunda femoris aus der A. iliaca externa 2 Abgang der A. circumflexa femoris lateralis aus der A. femoralis 3 Aufspaltung der A. circumflexa femoris medialis in ihre beiden Endäste (Rr. ascendens und descendens).

Anhand dieser Bilder wurden die linke und die rechte Seite auf ihre Symmetrie im Bezug auf die grossen arteriellen Gefässabzweigungen überprüft.

Zu den grossen Abzweigungen gehören der Abgang der A. profunda femoris von der A. iliaca externa und der Abgang der A. circumflexa lateralis aus der A. femoralis sowie die Aufspaltung der ACFM in ihre beiden Endäste, den R. ascendens und den R. descendens. Im rekonstruierten Modus wurde die Aufzweigung der ACFL in ihre Rami untersucht.

3.4.1 Korrosionspräparate

Den drei Schafen für die Korrosionspräparate sowie den drei Schafen für die Silikoninjektionspräparate wurden direkt nach der Euthanasie Epoxidharz bzw. gefärbte Silikonmasse in die Aorta abdominalis injiziert. Es handelte sich dabei um 6 Schafe, die im Rahmen eines anderen Projektes und um ein Schaf, das krankheitsbedingt euthanasiert wurde. Es wurden nur Tiere aus Projekten ausgewählt, die nicht den Bereich kaudal der Brustwirbelsäule betrafen und denen keine Substanzen verabreicht wurden, die Gefässveränderungen verursacht und damit die Präparatherstellung beeinflusst hätten. Die Euthanasie erfolgte in Allgemeinanästhesie mit 20-40ml Esconarkon (Streuli Pharma AG Uznach) i.v.. Um die Injektion des Silikons zu erleichtern, wurde dem Tier kurz vor der Euthanasie 5000 IE Heparin i.v. verabreicht.

Im Anschluss an die Euthanasie wurde der kaudale Teil des Kadavers zwischen dem 3. und 4. Lendenwirbel abgesetzt. Dabei wurde die Aorta abdominalis exakt quer so durchtrennt, dass kaudale Anteil der Aorta als intaktes Gefäss erhalten blieb.

Für die Korrosionspräparate wurde der hintere Teil des Tierkörpers am L4 abgesetzt und die Hinterbeine und das Becken mit einem Fixateur externe in physiologischer Stellung fixiert (siehe Abbildung 12). Durch den Fixateur externe wurden die Hüftgelenke stabilisiert und so ein Zerbrechen des Gefässbaumaussgusses nach der Korrosion der organischen Materie verhindert. In dorsaler Lage wurde das rot gefärbte Epoxidharz (BIODUR® E 20 Plus Rot, BIODUR® Products GmbH Heidelberg) injiziert. Es wurde ein Mischungsverhältnis von 100 Teilen Biodur E20 plus und 55 Teilen Biodur E20 plus Härter gewählt. Für die einzelnen Präparate wurden zwischen 260ml und 290ml Injektionsmasse verwendet.

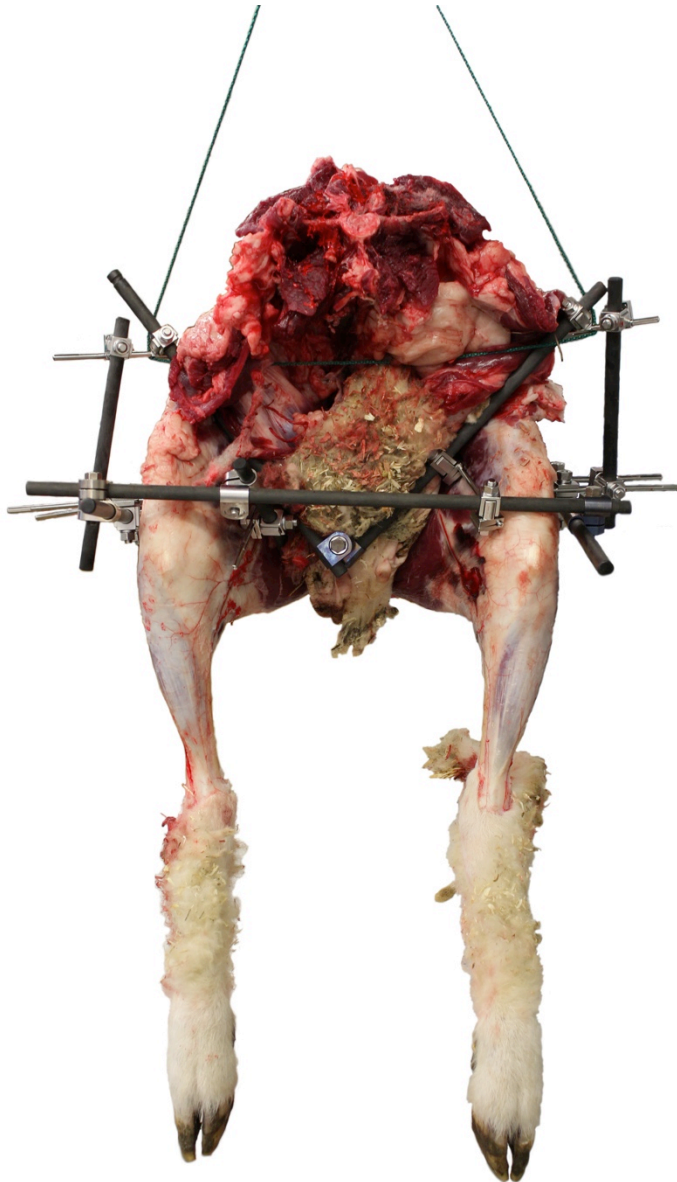


Abbildung 12: Fixateur externe als Stabilisierung des Präparates für eine anatomisch natürliche Position bei der Herstellung eines Korrosionspräparates

3.4.2 Silikoninjektionspräparate

Zur Herstellung der Silikoninjektionspräparate wurde das Silikonpolymer *BIODUR®* S10 (BIODUR® Products GmbH Heidelberg) verwendet. Die Härter S3 und S6 (BIODUR® Products GmbH, Heidelberg) wurden mit je 4% und Silc Pig® Silicone Pigments (Smooth-On, Inc., Easton) in gelb, grün und weiss mit je 1% beigemischt.

Der kaudal abgesetzte Teil des Kadavers wurde in dorsaler Lage fixiert. Hierfür wurden die Fesselgelenke mit Schraubklammern an einem Stativ befestigt, sodass die Klauen den obersten Punkt darstellten. Mit einer Knopfkanüle wurde die Aorta abdominalis aufgesucht. Anschliessend wurde die Kanüle in die Aorta geschoben und mit Garn

fixiert. Mit einer 20 ml Spritze wurde die grünlich gefärbte Silikonmasse mit geringem manuellen Druck durch die Kanüle injiziert, bis ein Anstieg des Widerstandes gefühlt werden konnte. Es wurde kurze Zeit gewartet, bis der Widerstand wieder gesunken war und dann weiter injiziert. Sobald sich der Widerstand nicht mehr verringerte, wurde das Injizieren eingestellt. Es konnten zwischen 60ml und 200ml Silikon appliziert werden. Im Anschluss wurden die Präparate für mindestens 24 Stunden zum Aushärten in einem Kühlraum bei 4°C gelagert und dann präpariert oder für spätere Präparationen bei -20°C eingefroren.

3.4.3 Verteilung der vaskulären Foramina

Die Zählung und Bestimmung der Verteilung der vaskulären Foramina am Übergang von Femurhals zu Femurkopf wurde analog der Arbeit von Lavigne⁵³ vorgenommen. Dazu wurden die Femurknochen frisch präpariert. Sie stammten von Schafen, die aufgrund eines anderen Versuches, oder zur Lebensmittelgewinnung geschlachtet beziehungsweise aufgrund eines anderen Versuches oder Krankheit euthanasiert wurden. Es wurden nur Femora benutzt, welche makroskopisch keine Veränderungen aufwiesen. Zur Präparation wurden die Knochen zuerst grob entfleischt und dann enzymatisch mit Papain mazeriert. Hierfür wurden die Knochen zuerst für etwa 10 Tage in ein Weichebad gelegt. Für das Weichebad wurde eine Flottenlänge von 1:30 bis 1:40 gewählt. Die Flottenlänge entspricht dem Verhältnis von Objekt zur Lösung. Es wurden pro Liter 10g bis 30 g NaCl, 0.5g SUPRALAN ON (SUPRALON ON, Bauer Handels GmbH, Fehraltorf, Schweiz) als Weichhilfsmittel und 0.5g SUPRALAN UF (Supralon UF, Bauer Handels GmbH, Fehraltorf, Schweiz) als Emulgator hinzugefügt. In diesem Bad wurden die Knochen bei einer Temperatur von 15°C bis 20°C und einem neutralem pH-Wert für 10 Tage eingeweicht. Im nächsten Schritt wurden die Knochen kurz in Wasser aufgekocht und dann in ein Bad mit Papain gegeben.

Eine Entfettung des Knochengewebes wurde chemisch-thermisch mit Methylenchlorid durchgeführt. Hierfür wurden die Knochen frei in einen geschlossenen Kasten gehängt, in dem im unteren Bereich Methylenchlorid erhitzt und im oberen Bereich wieder abkühlt wurde. Zum Schluss wurden die Femora für einige Stunden in fünfprozentiges Wasserstoffperoxid eingelegt und so gebleicht.

Die Anzahl und Verteilung der Foramina wurde photographisch mit vier Bildern pro Femur dokumentiert (siehe Abbildung 14). Hierfür wurde die digitale Spiegelreflexkamera Nikon D5000 benutzt. Als Übergang von Femurkopf zu Femurhals

wurde die Fläche festgelegt, die sich vom Rand der ehemaligen Knorpelfläche des Femurkopfes bis nach 10mm distal erstreckt (siehe Abbildung 13).

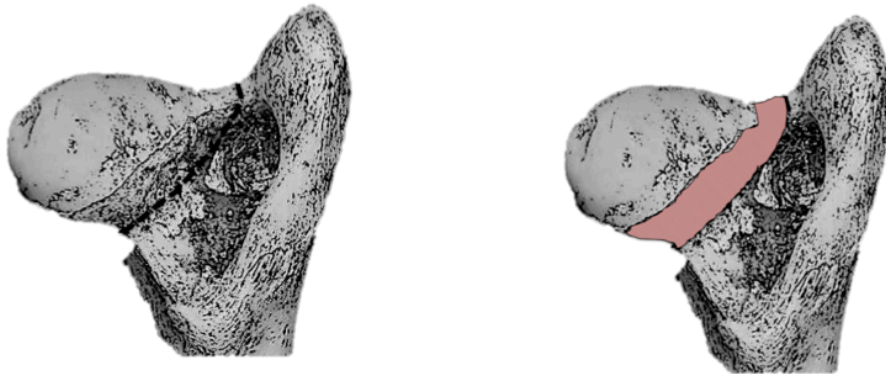


Abbildung 13: Proximaler Femur von kaudal: Übergang Femurkopf zu Femurhals: Fläche 10mm distal des Randes der Gelenkfläche. Linkes Bild: Die gestrichelte Linie zeigt die Grenzlinie 10mm unterhalb der Knorpelfläche. Rechtes Bild: Der rote Bereich stellt die Fläche dar, in der die vaskulären Foramina gezählt wurden.

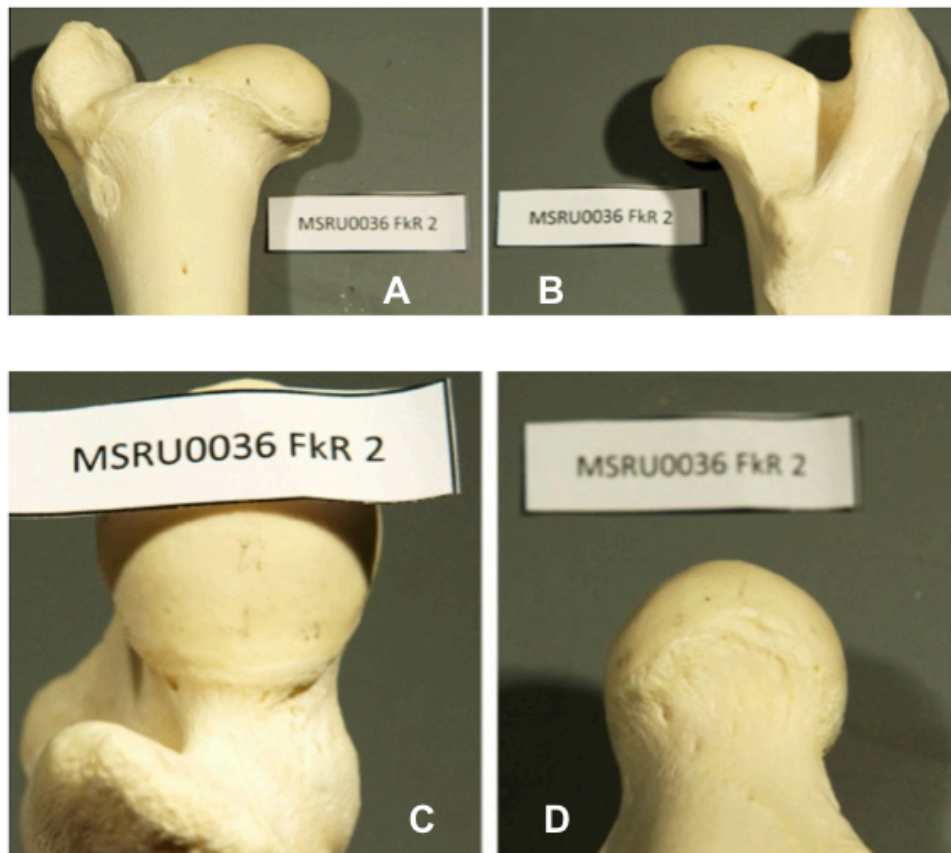


Abbildung 14: Photographische Dokumentation der vaskulären Foramina aus vier Perspektiven. A: Ansicht von kranial B: Ansicht von kaudal C: Ansicht von dorso-lateral D: Ansicht von ventro-medial

Der Femurkopf und der Übergang zum Femurhals wurden in zwölf Sektoren analog eines Zifferblatt-Prinzips eingeteilt. Hierbei stellt zwölf Uhr den am weitesten dorsal gelegenen Punkt, sechs Uhr den am weitesten ventral gelegenen Punkt, neun Uhr und drei Uhr jeweils die am weitesten kranial und kaudal gelegenen Punkte dar. Bei der Arbeit von Lavigne war im Gegensatz dazu der kranialste Punkt drei Uhr und der kaudalste Punkt neun Uhr. Um die Sektoren zu visualisieren, wurde ein farbloses Gummiband um den Femurkopf gespannt auf dem die zwölf Sektoren eingezeichnet waren (siehe Abbildung 15).



Abbildung 15: Proximaler Anteil des linken Femurs, Ansicht von kranial: Einteilung in 12 Sektoren analog eines Zifferblatts mit Hilfe eines Gummibandes.

Mit Hilfe einer Lupe wurde die Anzahl der vaskulären Foramina pro Sektor erfasst, welche mindestens einen Durchmesser von 0.4 mm hatten (siehe Anhang, Tabelle 5). Als Referenzdurchmesser wurden eine Kanüle mit 21 G (Aussendurchmesser von 0.4 mm) verwendet.

3.4.4 Off-Set Korrektur beim Schaf: In vivo Modell und Überprüfung der Vaskularität des Femurkopfes mittels MRI

Zur Überprüfung der Hypothese, dass eine Off-Set Korrektur beim Schaf ohne das Risiko einer avaskulären Femurkopfnekrose durchgeführt werden kann, wurde am linken Femur von zehn weiblichen, gesunden Schweizer Alpenschafen eine Varisationsosteotomie zur Induktion eines FAI durchgeführt. Neun Schafe erhielten in

unterschiedlichen Zeitabständen eine Korrektur des Off-Sets. Ein Schaf erhielt gleichzeitig mit der Varisationsosteotomie eine Korrektur des Off-Sets. Fünf Tiere erhielten nach 68 - 70 Tagen, eines nach 99 Tagen und eines nach 140 Tagen eine Off-Set Korrektur. Bei einem Tier wurde keine Off-Set Korrektur durchgeführt, es wurde 140 Tage nach der FAI Induktion euthanasiert. Alle anderen Tiere wurden rund 140 Tage nach der Off-Set Korrektur euthanasiert und alle Hüften wurden im Anschluss im Magnetresonanztomographen untersucht.

3.4.4.1 Präoperative Versorgung und Anästhesie

Die Schafe wurden mindestens sieben Tage vor der Operation zur Akklimatisation in die Stallung des Tierspitals Zürich gebracht. Dort wurde jedes Tier einem allgemeinen klinischen Gesundheitscheck unterzogen. Die Tiere wurden in den Tagen vor der OP gewogen und es wurde von jedem Tier Blut entnommen, welches hämatologisch und blutchemisch untersucht wurde, um die Operationstauglichkeit zu überprüfen. Vierundzwanzig Stunden vor dem Eingriff wurde den Tieren das Futter entzogen. Wasser war durchgehend ad libitum vorhanden. Spätestens eine halbe Stunde vor Einleitung der Anästhesie wurden die Tiere noch im Stall mit Xylazin (0.1mg/kg i.m., Xylazin Streuli, Streuli Pharma AG, Uznach, Schweiz) und Buprenorphin (0.01mg/kg i.m., Temgesic®, Reckitt Benckiser AG, Wallisellen, Schweiz) sediert. Zur Anästhesieeinleitung wurde ein Venenkatheter (Vygonüle S® G14, Vygon GmbH; Aachen, Deutschland) in die V. jugularis gelegt. Als Schmerz- und Entzündungsprophylaxe bekamen die Tiere Caprofen (4mg/kg i.v., Rimadyl®, Pfizer, Vertrieb Dr. Gräub AG, Zürich, Schweiz) sowie Benzylpenicillin (35.000 I.U./kg i.v., Procain-Penicillin ad us. vet., G. Streuli & Co AG, Uznach, Schweiz) und Gentamicin (6mg/kg i.v. oder s.c., Vetagent® ad us. vet., Veterinaria AG, Zürich, Schweiz) als Infektionsprophylaxe. Zusätzlich wurde jedes Schaf einer Tetanusprophylaxe mit Tetanusserum (3000 I.E. pro Tier, s.c., Tetanus-Serum Intervet, MSD Animal Health, Luzern, Schweiz) unterzogen. Die Schafe wurden mit der intravenösen Gabe von Ketamin (3-5mg/kg i.v., Narketan 10®, Vetoquinol AG, Ittigen, Schweiz) und Diazepam (0.1mg/kg, i.v., Valium®, Roche Pharma AG, Reinach, Schweiz) anästhesiert. Propofol (0.4-0.6 mg/kg, i.v., Propofol® 1% Fresenius, Fresenius Kabi AG Stans, Schweiz) wurde zur Vertiefung der Anästhesie nach Bedarf appliziert. Im Anschluss wurden die Tiere endotracheal intubiert und in den Operationssaal gebracht.

3.4.4.2 Operationsablauf

Im Operationsraum wurden die Anästhesie durch eine balancierte Anästhesie mit 1.5-2% Isofluran (Attane Isoflurane ad us. vet., MINRAD INC., Buffalo, NY, USA) in 2l Sauerstoff und einer Propofol-Dauertropfinfusion (0.1-0.8 mg/kg/min i.v.; Propofol 1% Fresenius, Fresenius Kabi AG, Stans, Schweiz) aufrechterhalten. Eine lumbosakrale Epiduralanästhesie mit Morphin (0.1mg/kg, Morphin-HCL, Amino AG, Neunhof, Schweiz) wurde durchgeführt.

Die Schafe wurden lateral auf die rechte Seite gelagert. Das linke Bein wurde dabei von einem Rundkissen so unterstützt, dass es parallel zum Tisch lag. Der distale Anteil der linken Hintergliedmasse wurde dabei etwas erhöht, sodass das Bein während der Operation entspannt und ohne Rotationsbewegung positioniert war.

Die linke Hintergliedmasse wurde grossflächig bis zum Tarsalgelenk geschoren und der distale nicht geschorene Anteil mit Verbandsmaterial abgeklebt. Das geschorene Feld wurde gründlich gereinigt, entfettet und desinfiziert.

3.4.4.2.1 Varisationsosteotomie

Für die Varisationsosteotomie wurden ein Kleinfragment-Set sowie spezielle Varisationsinstrumente (DePuy Synthes, Zuchwil, Schweiz) verwendet. Die Spezialinstrumente bestanden aus einer Führungsvorrichtung für den Bohrer, zwei Bohrerspitzen und einer Führungsvorrichtung für die Osteotomie. Zur Fixierung der Osteotomie wurde eine vorgebogene Hakenplatte (DePuy Synthes, Zuchwil, Schweiz) verwendet. Für die Varisationsosteotomie wurden zwei verschiedenen Zugänge gewählt. Bei den ersten fünf wurden ein transglutealer Zugang gewählt, für die anderen fünf wurde ein kraniolateraler Zugang genutzt. Für beide Zugänge erfolgte die leicht gebogene Schnittein-zision kranial des Trochanter major. Bei dem transglutealen Zugang wurden danach die Fasern des M. gluteobiceps und die des darunterliegenden M. gluteus medius durchtrennt. Die Durchtrennung des M. gluteobiceps begann direkt auf dem Trochanter major und die Fasern wurden dann, entlang ihres Verlaufes, nach proximal durchtrennt. Die Durchtrennung des M. gluteus medius verlief gleichermassen. Der Muskelbauch des M. gluteus medius wurde nach kaudal retrahiert und so ein Zugang zum proximalen Bereich des Femurs ermöglicht.

Beim kraniolateralen Zugang wurde durch das teilweise Ablösen des M. vastus lateralis und intermedius vom kaudalen Anteil die Lateralseite des Femurs sichtbar. Am medialen Teil des proximalen Femurbereiches wurde nun der Trochanter minor

identifiziert und zum Schutz des Weichteilgewebes mit Retraktoren die kranial und kaudal angesetzt werden, dorsal freigelegt.

Mit der speziellen Bohrlehre wurden die Höhe der Osteotomie sowie die Bohrlöcher für die Hakenplatte festgelegt. Die Osteotomielinie musste dabei proximal des Trochanter minors liegen und klar mit dem Elektroauter markiert werden. Dabei musste gut darauf geachtet werden, dass die beiden Bohrlöcher für die Haken in der Mitte des Trochanter major und der distale Part der Bohrlehre in der Mitte des Femurschaftes liegen (siehe Abbildung 16).

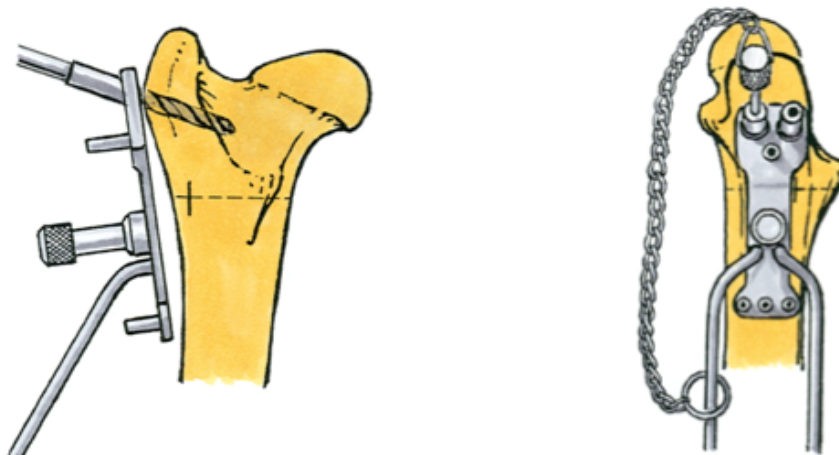


Abbildung 16: Ansetzen der Bohrlehre: Ansicht von kaudal (links) und von lateral (rechts). (aus: „Fiechter RM-E: Am Schafmodell reproduziertes Femoroacetabuläres Impingement, häufigste Ursache der frühen Osteoarthritis beim nichtdysplastischen Hüftgelenk des Menschen. Zürich, 2005“¹⁾)

Nach dem Bohren der beiden oberen Löcher für die Plattenhaken wurde die Bohrführung entfernt und die Orientierungshilfe für die Osteotomie in diese Bohrlöcher eingebracht.

Für den ersten Knochenschnitt wurde die oszillierende Säge in einem 90° Winkel kurz über dem Trochanter minor geführt. Der zweite Schnitt wurde etwa in einem Winkel von 10° versetzt durchgeführt (siehe Abbildung 17). Dabei zeigte der grössere Keilanteil nach medial. Die Hüftkapsel sollte unverletzt bleiben.

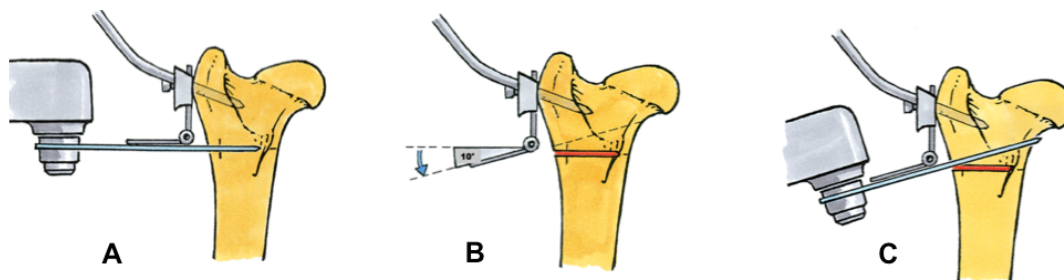


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Schnitfführung bei der Varisationsosteotomie: a: Schnitfführung des ersten Schnittes mit der oszillierenden Säge in einem 90° Winkel kurz über dem Trochanter minor. b: Schnittlinie für den zweiten Schnitt in einem 10° nach ventral versetzten Winkel. c: Schnitfführung des zweiten Schnittes. (Mit freundlicher Genehmigung von Dr. R. Fiechter¹⁾)

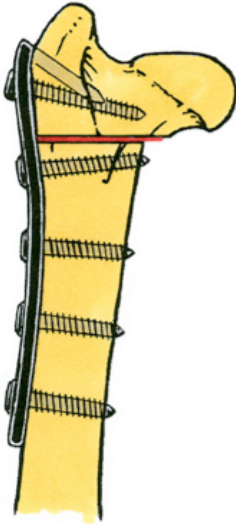


Abbildung 18: Fixation der Osteotomie und Kompression der beiden Fragmente durch eine Hakenplatte. Aus: „Fiechter RM-E: Am Schafmodell reproduziertes Femoroacetabuläres Impingement, häufigste Ursache der frühen Osteoarthritis beim nichtdysplastischen Hüftgelenk des Menschen. Zürich, 2005“¹

Der proximale und distale Knochenanteil wurden so reponiert, dass die medialen Cortices möglichst aufeinanderlagen. Damit bildete sich wegen des Dimensionsunterschiedes der beiden Knochenteile plattennah eine Stufe.^f

Eine schon vorgeformte Hakenplatte wurde für die Osteosynthese mit Corticalisschrauben am Knochen fixiert (siehe Abbildung 18). Danach wurde die Muskeln wieder verbunden und die Wunde routinemässig verschlossen. Der Hautschnitt wurde mit Klammern adaptiert und es wurde eine sterile Wundabdeckung angebracht.

3.4.4.2.2 Off-Set Korrektur

Eine Off-Set-Korrektur wurde nach unterschiedlichen Intervallen durchgeführt. Der Hautschnitt der primären OP wurde wiedereröffnet und nach kranial verlängert (siehe Abbildung 19).

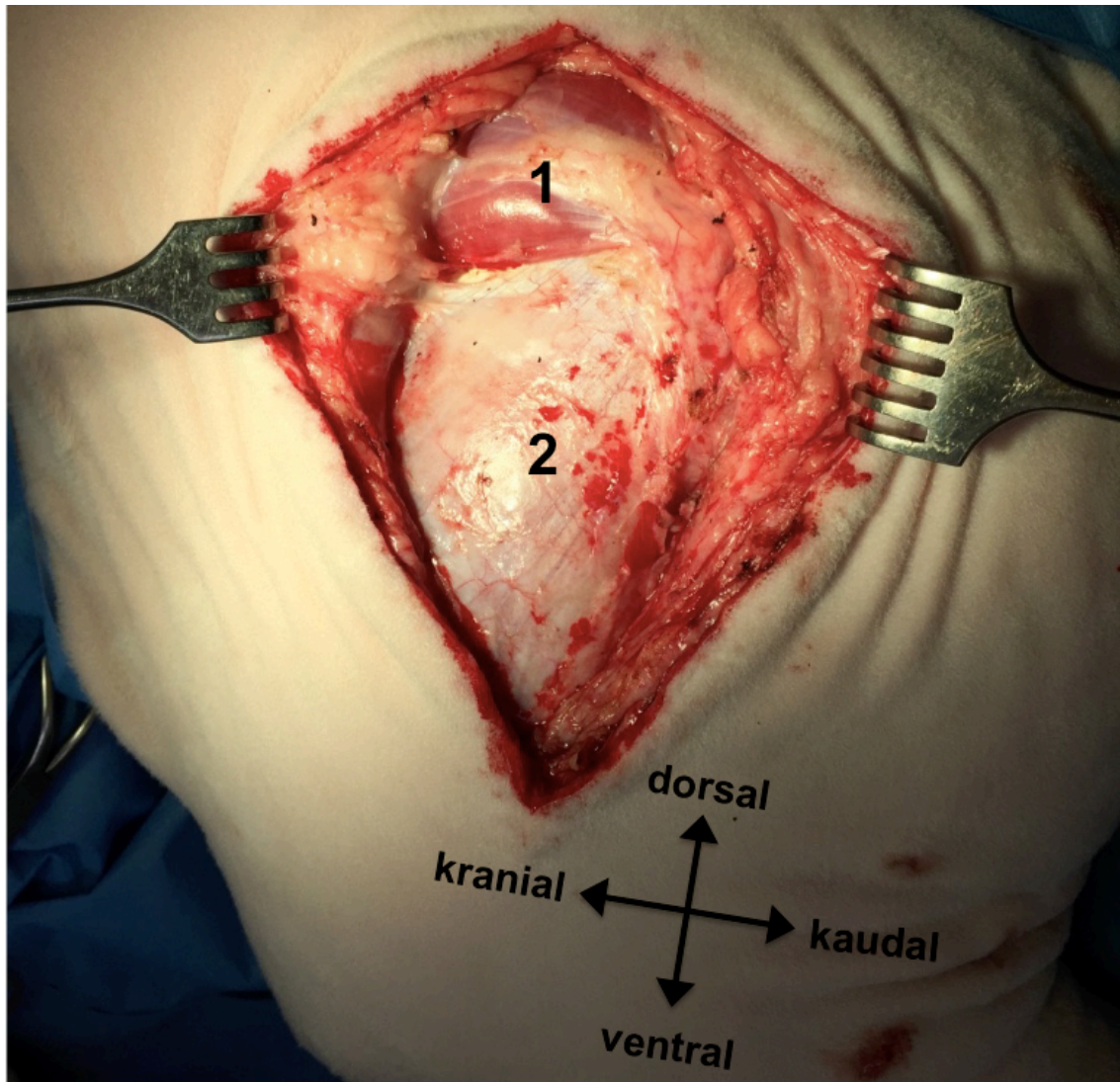


Abbildung 19: Linke Hüfte Ansicht von lateral: 1: M. gluteus medius, 2: M. vastus lateralis des M. quadriceps femoris

Der M. gluteobiceps und M. gluteus medius wurden nach kaudal retrahiert und so der M. gluteus profundus freigelegt (siehe Abbildung 20). Der M. gluteus profundus wurde entlang seiner Fasern gespalten. Der M. gluteus profundus beim Schaf entspricht dem M. gluteus minimus des Menschen. Die nun freigelegte Hüftgelenkscapsel wurde eröffnet, um den Femurkopf darzustellen (siehe Abbildung 21).

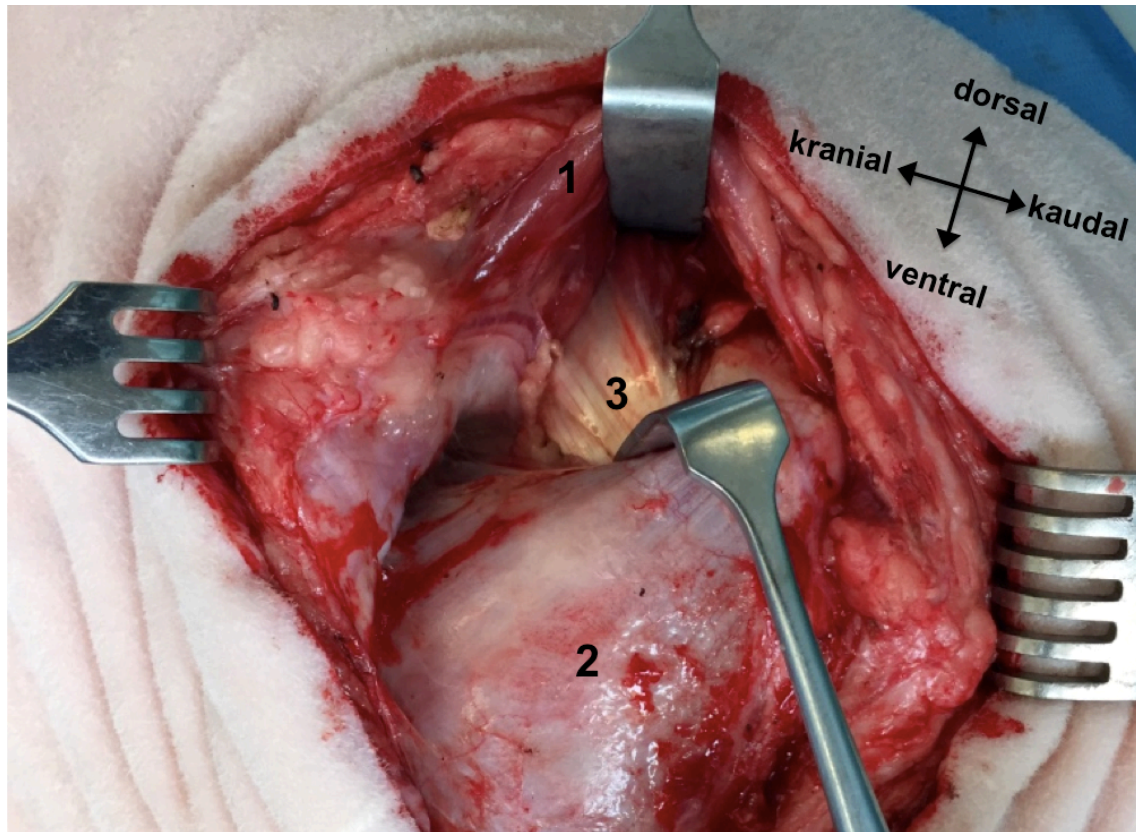


Abbildung 20: Linke Hüfte Ansicht von lateral: 1: M. gluteus medius, 2: M. vastus lateralis des M. quadriceps femoris, 3: M. gluteus accessorius

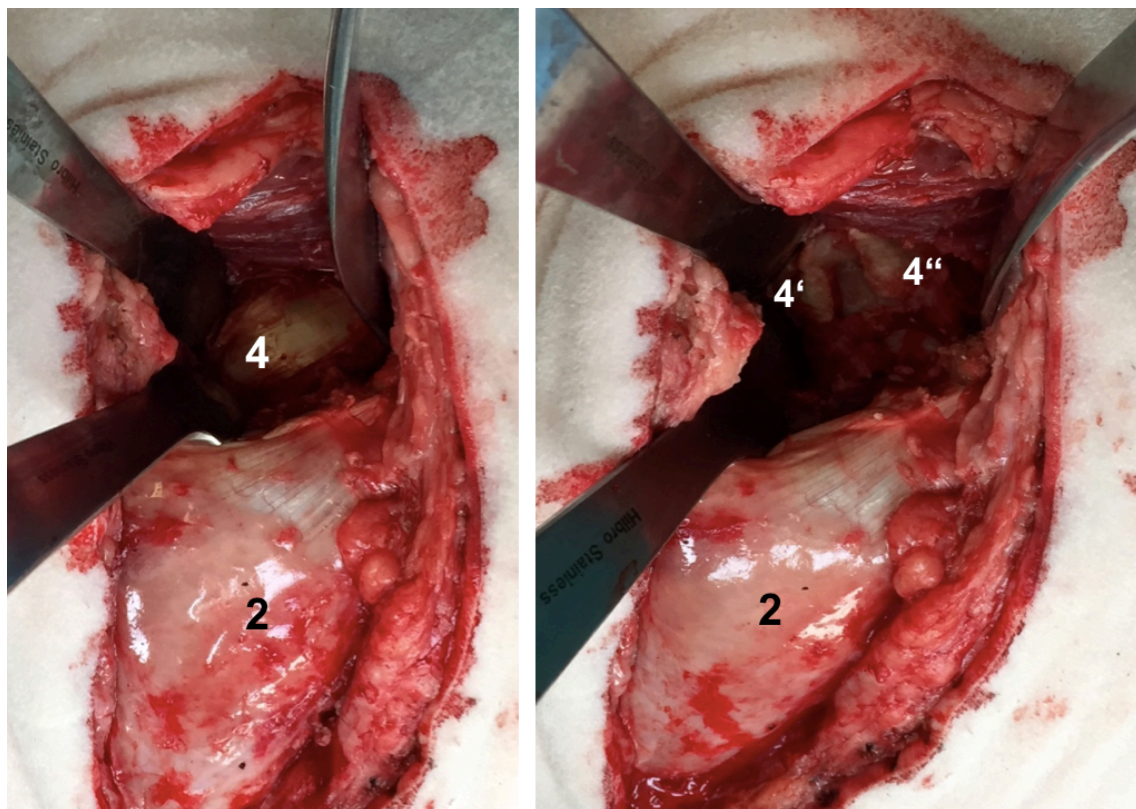


Abbildung 21: Linke Hüfte Ansicht von lateral, 2: M. vastus lateralis des M. quadriceps femoris, 4: Hüftgelenkscapsel, 4' und 4'': Kapselanteile nach Eröffnung der Hüftgelenkscapsel

Die Resektion des Impingementanteils am Femurkopf-/ halsübergang wurde mit einem elektrischen Hochgeschwindigkeitsbohrer (Electric Pen Drive, Synthes, Schweiz) vorgenommen (siehe Abbildung 22). Es wurde darauf geachtet die vaskulären Retinakuli nicht zu verletzen (siehe Abbildung 23 und Abbildung 24). Im Anschluss wurden die Muskeln wieder verbunden und die Haut mit Klammern adaptiert. Als Wundabdeckung wurden sterile Tupfer über der Naht fixiert.

Ziel der Resektion des Impingementanteils war eine Wiederherstellung der Sphärizität des Femurkopfes (siehe Abbildung 25 und Abbildung 26).

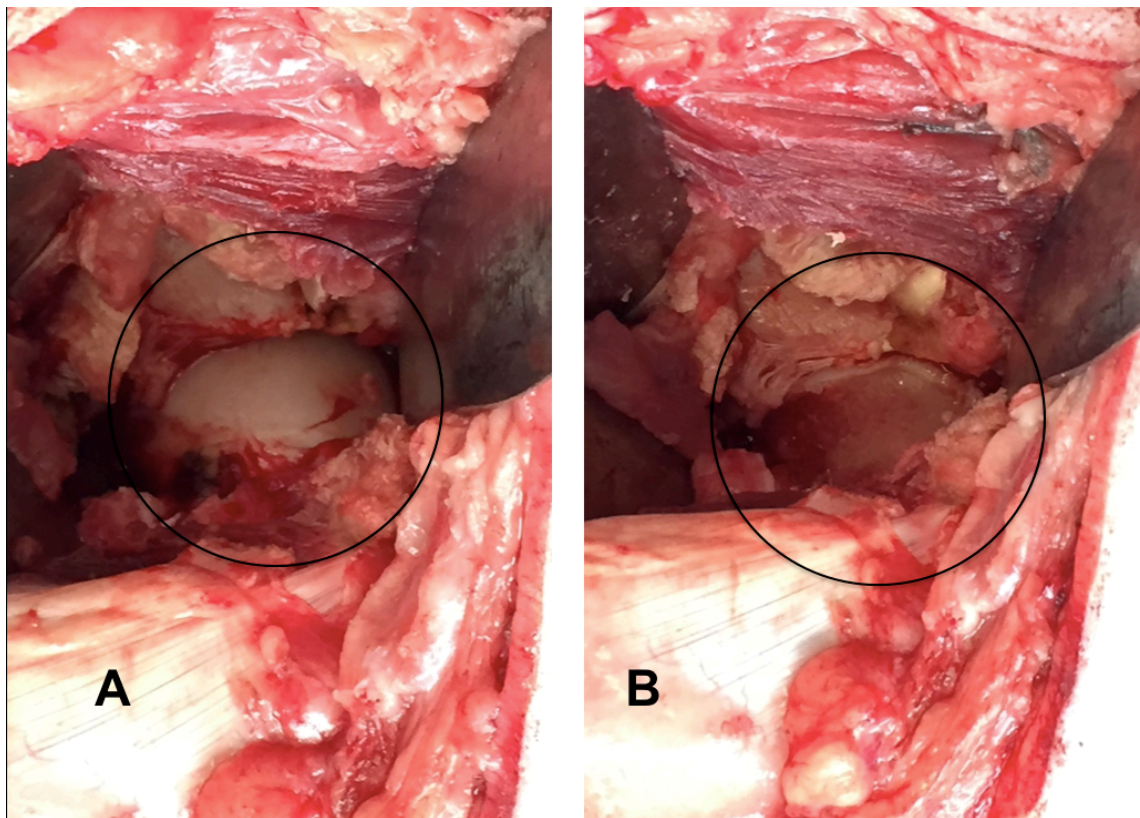


Abbildung 22: Linkes Hüftgelenk Schaf, Ansicht von dorsal, A: Darstellung von Femurkopf und Femurkopf/-hals Übergang, B: Nach der Korrektur des Off-Sets am Femurkopf/-halsübergang

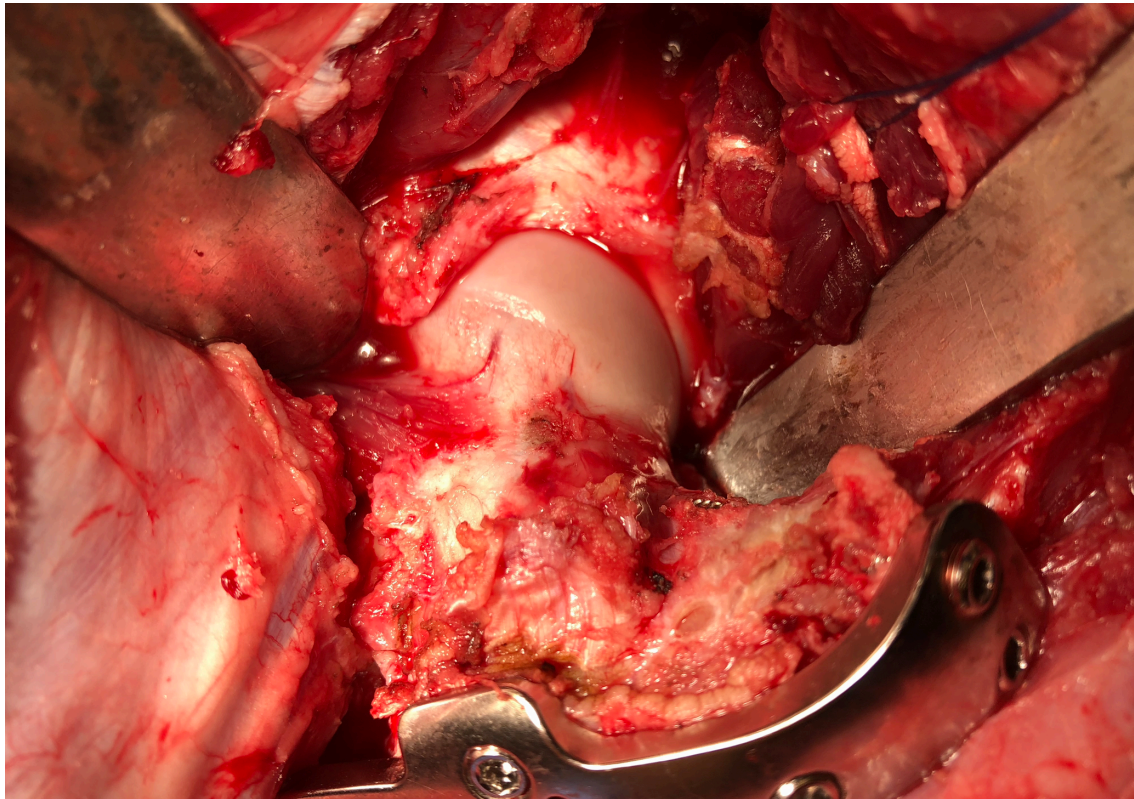


Abbildung 23: Linkes Hüftgelenk Schaf, Ansicht von kranio-dorsal: zur besseren Darstellung wurden der M. profundus abpräpariert: die Eintrittstellen des kranialen Retinakulums sind gut sichtbar.

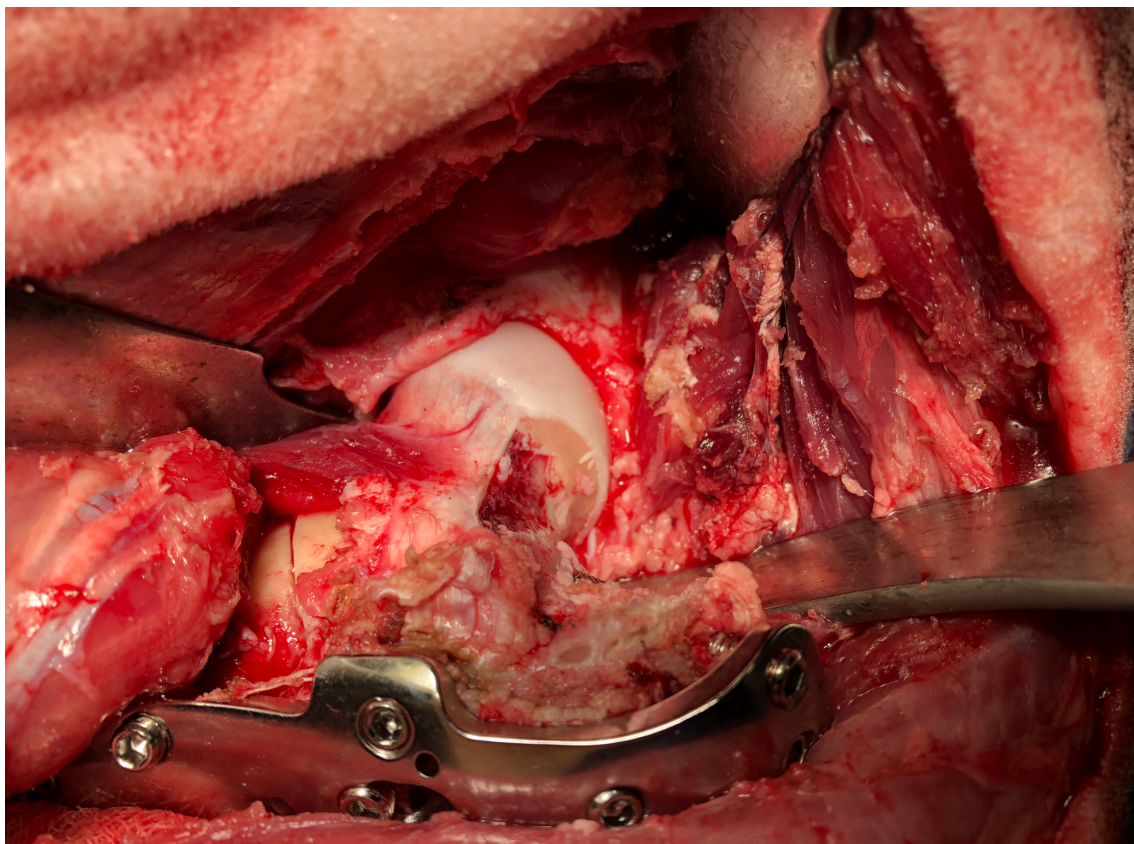


Abbildung 24: Linkes Hüftgelenk Schaf, Ansicht von kranio-dorsal nach der Off-Set Korrektur: zur besseren Darstellung wurden der M. profundus abpräpariert: die Eintrittstellen des kranialen Retinakulums sind gut sichtbar.

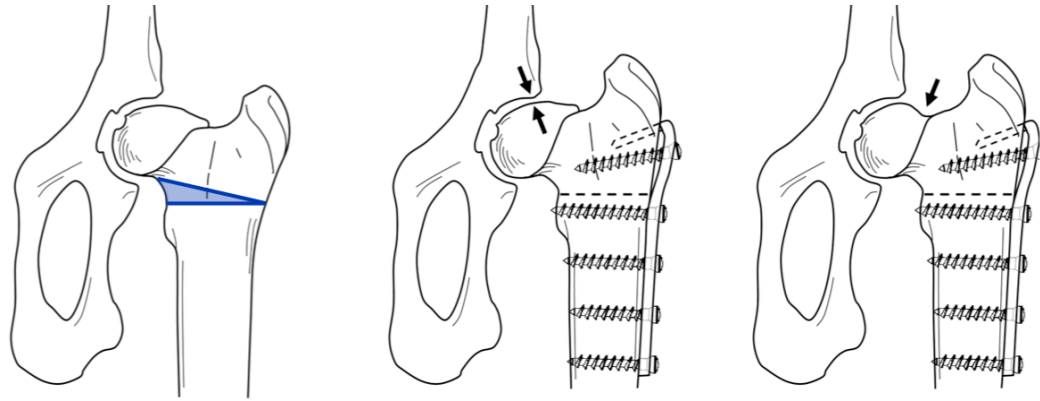


Abbildung 25: Im ersten Schritt wird eine Varisationsosteotomie durchgeführt (Entfernen des blauen Anteiles); die Pfeile in der Mitte kennzeichnen das entstandene Impingement; der Pfeil rechts im Bild zeigt die Stelle der Off-Set Korrektur. (mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. med. Moritz Tannast, Inselspital Bern, Schweiz)

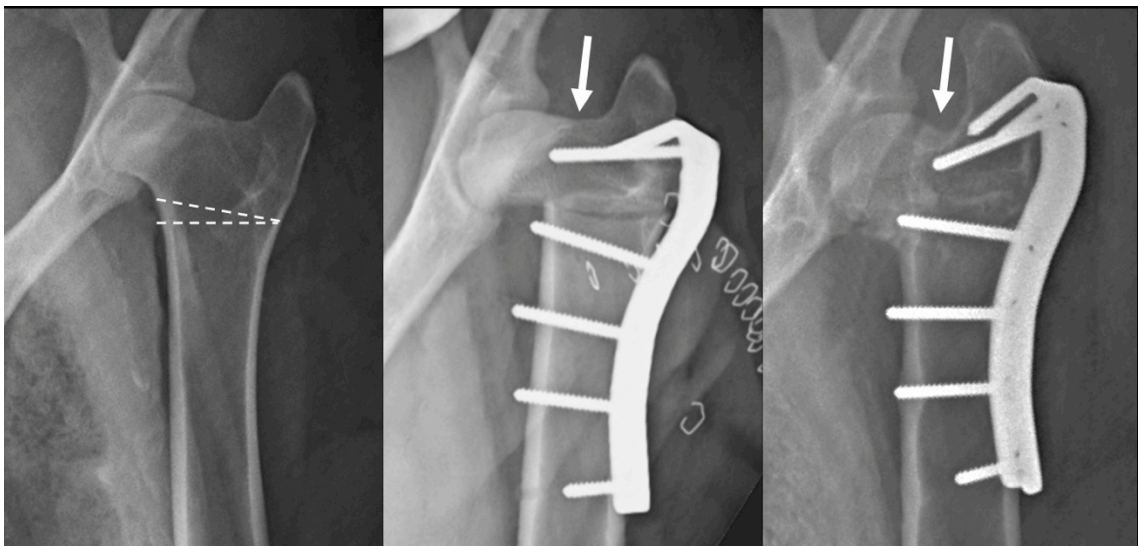


Abbildung 26: Röntgenbilder einer linken Schafhüfte im ventrodorsalen Strahlengang: Die gestrichelte Linie zeigt die geplanten Osteotomielinien. Der weisse Pfeil zeigt auf die Stelle des Impingements. Mittiges Bild nach der Varisationsosteotomie aber vor der Korrektur. Das rechte Bild zeigt den Zustand nach der Korrektur. (mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. med. Moritz Tannast, Inselspital Bern, Schweiz)

3.4.4.3 Postoperative Versorgung

Im Anschluss an die Varisationsosteotomie wurden die Tiere einem Kontrollröntgen unterzogen. Den Schafen wurde in noch anästhesiertem Zustand ein Suspensorium angelegt und sie wurden auf einer Trage in den Stall gebracht. Dort wurden sie mit Hilfe des Suspensoriums (siehe Abbildung 27) beim Aufstehen so unterstützt, dass das operierte Bein kaum belastet wurde. Die Schafe wurden nach der Varisationsosteotomie für vier Wochen und nach der Off-Set Korrektur für zehn Tage im Suspensorium

gehalten, um das Hinlegen und Aufstehen und damit eine zu grosse Belastung des Hüftgelenkes zu vermeiden.



Abbildung 27: Schaf im Suspensorium

3.4.4.4 Probengewinnung und –aufarbeitung

Rund 140 Tage nach der Off-Set Korrektur bzw. bei dem Kontrolltier nach der Varisationsosteotomie wurden die Tiere euthanasiert. Hierfür wurden sie mit Buprenorphin (0.01mg/kg i.m., Temgesic®, Reckitt Benckiser AG, Wallisellen, Schweiz) und Xylazin (0.1mg/kg i.m., Xylazin Streuli, Streuli Pharma AG, Uznach, Schweiz) leicht sediert. Im Anschluss wurde ein Venenverweilkatheter gelegt. Den Schafen wurden 25ml des Kontrastmittels Omniscan (GE Healthcare) in die V. jugularis injiziert, anschliessend wurden sie eine halbe Stunde geführt, um eine optimale Verteilung des Kontrastmittels zu gewährleisten. Danach erfolgte die Euthanasie der Schafe mit 20ml-40ml Pentobarbital i.v. (Esconarkon ad. us. vet.; Streuli Pharma AG, Uznach, Schweiz). Anschliessend wurden Röntgenbilder der Hüfte angefertigt, dann der ursprüngliche Operationszugang wiedereröffnet und die Implantate entfernt. Die Wunde wurde mit einem 2-0 Prolene provisorisch wieder verschlossen. Das euthanasierte Tier wurde einem CT Scan unterzogen und danach in die Räume der Anatomie transportiert.

Dort wurde der hintere Teil des Tierkörpers auf Höhe des L6 abgesetzt, das Becken mit Hilfe einer Bandsäge in der Mitte der Wirbelsäule in zwei Hälften geteilt und die Gliedmassen auf Höhe der Kniegelenke abgesetzt. Jede Hüfte wurde nun soweit freipräpariert, dass sie in die Kniespule des MRI passte. Dafür musste ein Teil der Muskelmasse rund um Oberschenkel und Becken entfernt werden. Die Hüften mit ihrem umschliessenden Gewebe wurden in Klarsichtfolie gewickelt und bis zur Untersuchung in einer Styroporbox mit Wärmeelementen gelagert, um für den Erhalt einer optimalen Signalstärke das Abkühlen des Gewebes zu verhindern.

Für die MRI-Untersuchung wurde die Kniespule eines 3 Tesla Hochfeld-Magnetresonanztomographs (Philips, Ingenia 3T) verwendet.

3.4.4.5 Radiologische Auswertungen

Die Auswertung der Röntgenbilder und des MRI erfolgten visuell nach der Klassifikation der Association Research Circulation Osseous (ARCO, siehe Tabelle 2).

Stadium	Histologie und Bildgebung
0	Normalbefund in Röntgenbild, MRT und Szintigraphie Nekrosezeichen in der Histologie
1	Normales Röntgenbild/CT pathologischer MR- oder Szintigraphiebefund betroffener Femurkopfanteil lateral, zentral oder medial Beteiligung der Femurkopfbzirkumferenz: <ul style="list-style-type: none"> - 1a: 15% - 1b: 15-30% - 1c: 30%
2	Im Röntgenbild Strukturveränderungen des Knochens ohne Konturveränderungen des Femurkopfes bei noch normalem Gelenkspalt für Hüftkopfnekrosen spezifische MRT-Befunde Beteiligung der Femurkopfbzirkumferenz: <ul style="list-style-type: none"> - 2a: 15% - 2b: 15-30% - 2c: 30%
3	Im Röntgenbild Knochenstrukturveränderungen mit subchondraler Fraktur in Form einer sichelförmigen Aufhellungszone (Crescent Sign); Kontur des Femurkopfes flacht sich ab; normal weiter Gelenkspalt Crescent Sign: <ul style="list-style-type: none"> - 3a: Crescent Sign 15% der Gelenkfläche bzw. Femurkopf um 2mm abgeflacht - 3b: Crescent Sign 15-30% der Gelenkfläche bzw. Femurkopf um 2-4mm abgeflacht - 3c: Crescent Sign 30% der Gelenkfläche bzw. Femurkopf um 4mm abgeflacht
4	Entwicklung zur Arthrosis deformans mit abgeflachtem Hüftkopf und Gelenkspaltverschmälerung Keine weitere Subklassifikation und Quantifizierung

Tabelle 2: ARCO-Klassifikation der Hüftkopfnekrose modifiziert nach: Vahlensieck M, Baur-Melnyk A: MRT des Bewegungsapparats, Stuttgart : Georg Thieme, 2015⁵⁴

4 Resultate

4.1 Computertomographische Angiographie (CTA)

Die Aorta konnte nur in drei CTA identifiziert werden. Bei diesen drei Aufnahmen konnte jeweils der Abgang der A. iliaca sinistra sowie ein Grundstamm (Truncus primitiv), der sich wiederum in den gemeinsamen Stamm der A. iliaca interna sinistra und dextra sowie der A. iliaca externa dextra aufteilte nachvollzogen werden (siehe Abbildung 28).

Der Grundstamm, der nur links vorkam, war die einzige immer vorkommende seitensymmetrische Abweichung die festgestellt wurde.

Die Gefäßverzweigungen abgehend von der A. iliaca externa bis zur Verzweigung der A. circumflexa femoris lateralis und der A. profunda femoris waren bei 29 von 30 Hüften konstant. Es konnte nur eine einzige Variation festgestellt werden. Bei 14 von 15 Schafen war der Verlauf der linken und der rechten Seite in diesem Teilabschnitt symmetrisch (siehe Abbildung 29). Bei einer rechten Hüfte entsprang die ACFL aus der A. profunda femoris anstatt aus der A. femoralis (siehe Abbildung 32).

Die ACFM bildete bei allen 30 Hüften die Fortsetzung der A. profunda femoris. Ihre Aufteilung in die Rr. ascendens und descendens war bei allen 30 Hüften vorhanden und seitensymmetrisch. Die Rr. profundus, obturatorius und acetabularis waren bei unseren Untersuchungen im 3DVR nicht identifizierbar.

Die ACFL zeigte zwei Varianten für ihren Ursprung. Am häufigsten entsprang sie aus der A. femoralis (siehe Abbildung 30 und Abbildung 31). Dies war bei 29 von 30 Hüften (96.67%) der Fall. Einmal zweigte die ACFL aus der A. profunda femoris ab. Diese Variabilität war in diesem Individuum nur einseitig rechts. Die ACFL zweigte hier nach dem Truncus pudendoepigastricus aus der A. profunda femoris ab. Die Aufzweigung der ACFL in ihre Rami konnte bei 26 von 30 Hüften im 3DVR ausgewertet werden. Bei allen 26 Hüften wurde nach dem Ursprung der ACFL zuerst der Abgang des R. descendens identifiziert. Im Anschluss bildete sich ein gemeinsamer Stamm der sich in den R. transversus und der R. ascendens aufspaltete (siehe Abbildung 30 und Abbildung 31).

Die gewöhnlichen Abgänge waren wie folgt:

1. Aorta

1.1. A. iliaca externa sinistra

1.1.1. A. circumflexa ilium profunda

1.1.2. A. femoralis

1.1.2.1. A. circumflexa femoris lateralis

1.1.3. A. profunda femoris

1.2. Truncus primitiv

1.2.1. A. iliaca interna communis

1.2.1.1. A. iliaca interna sinistra

1.2.1.2. A. iliaca interna dextra

1.2.2. A. iliaca externa dextra

1.2.2.1. A. circumflexa ilium profunda

1.2.2.2. A. femoralis

1.2.2.2.1. A. circumflexa femoris lateralis

1.2.3. A. profunda femoris

1.2.3.1. A. circumflexa femoris medialis

1.2.3.1.1. R. descendens

1.2.3.1.2. gemeinsamer Truncus

1.2.3.1.2.1. R. transversus

1.2.3.1.2.2. R. ascendens

Die Abzweigung der A. circumflexa femoris lateralis aus der A. femoralis befand sich kranio-distal des Acetabulums. Die Aufweigung der A. circumflexa medialis in ihrer Rami fand kaudo-distal des Acetabulums statt.

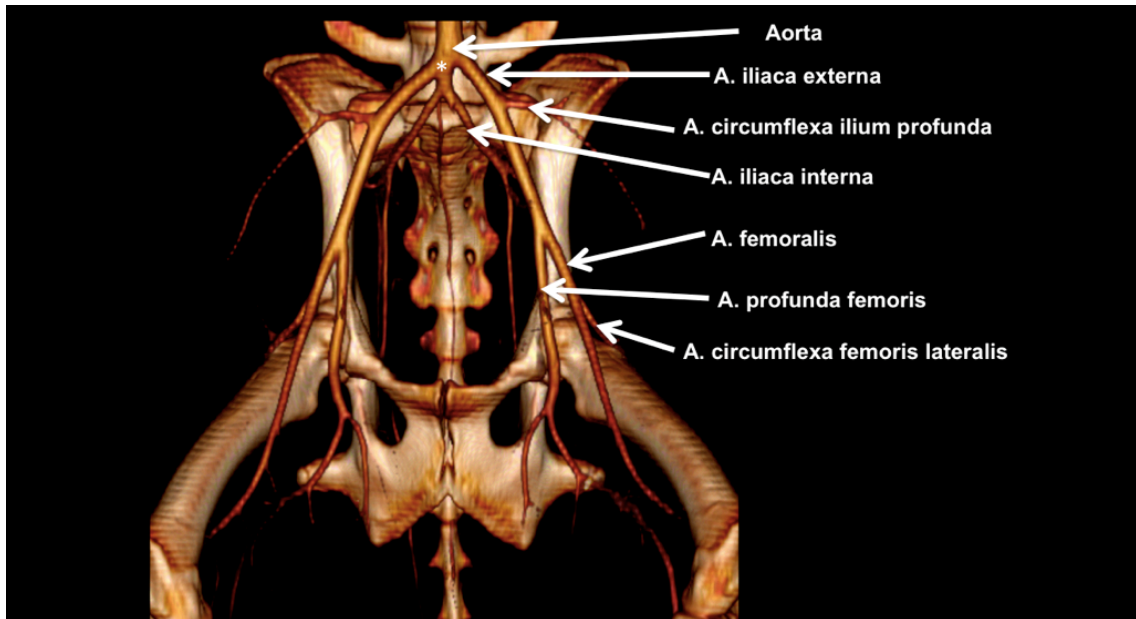


Abbildung 28: 3D Volumen Rendering (3DVR): Darstellung der Knochen und Gefäße einer Schafhüfte und von ventral, * markiert den Grundstamm (Truncus primitiv)

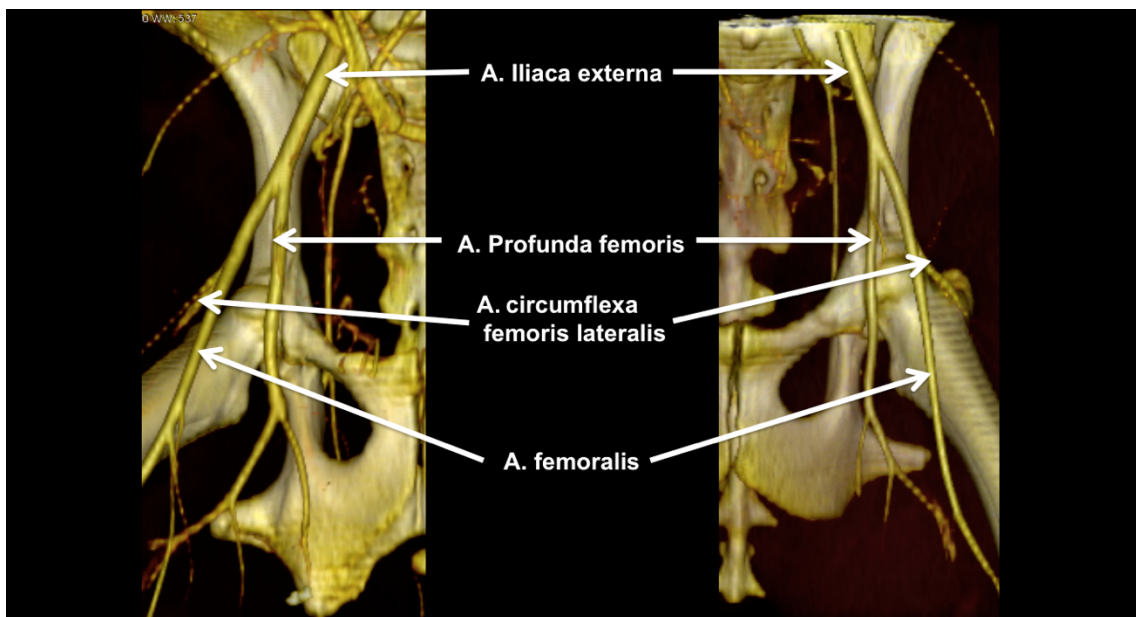


Abbildung 29: 3D Darstellung der Knochen und Gefäße: ventrale Ansicht: rechte Hüfte und linke Hüfte von zwei unterschiedlichen Individuen

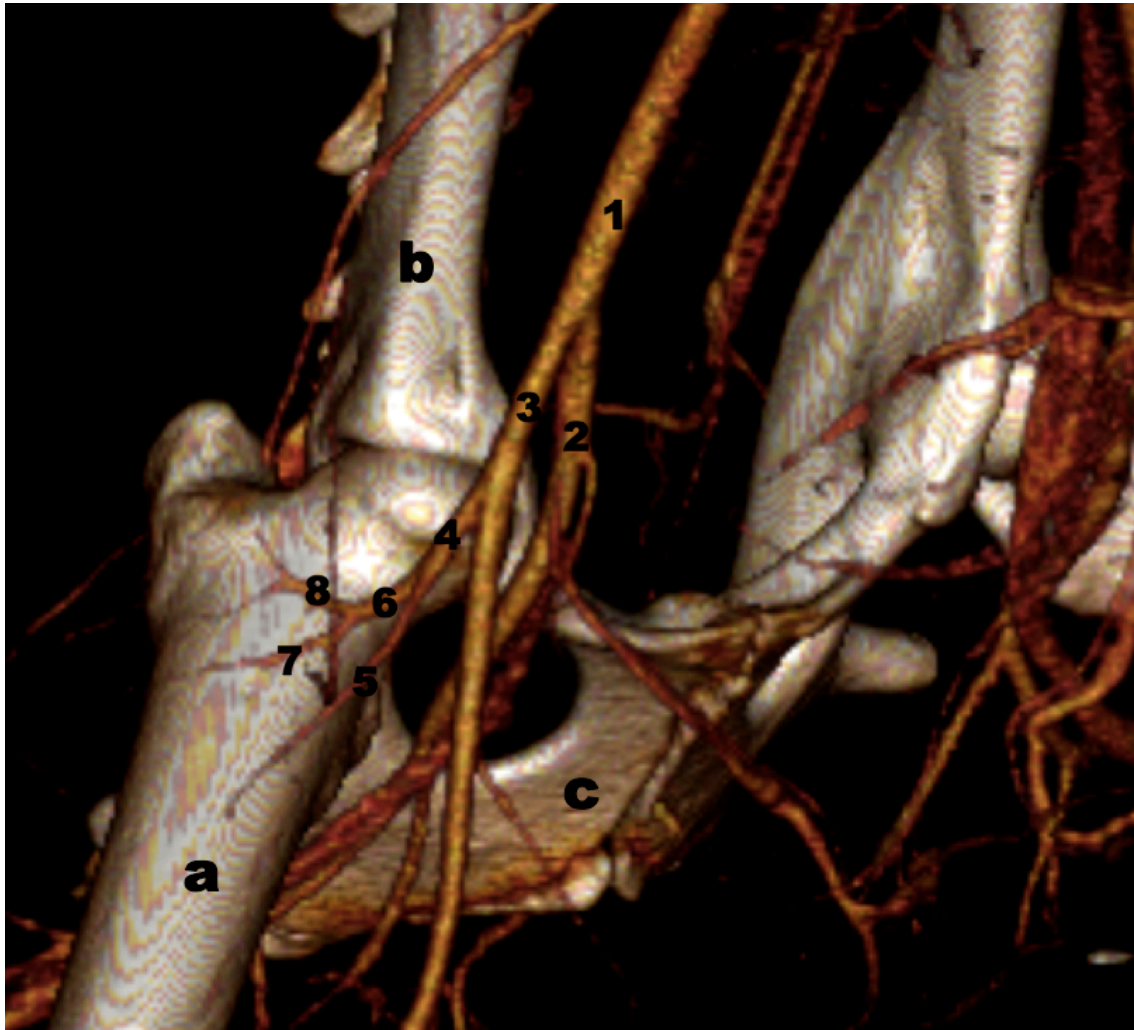


Abbildung 30: Ansicht eines Beckens von kranio-ventral: a: Femur, b: Os ilium, c: Os pubis, 1: A. iliaca externa, 2: A. profunda femoris, 3: A. femoralis, 4: ACFL, 5: R. descendens der ACFL, 6: gemeinsamer Stamm vom R. transversus und R. ascendens der ACFL, 7: R. transversus der ACFL, 8: R. ascendens der ACFL

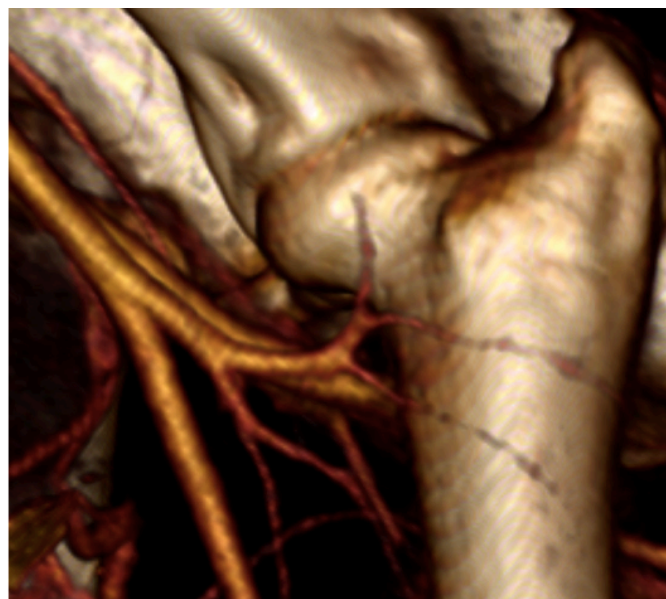
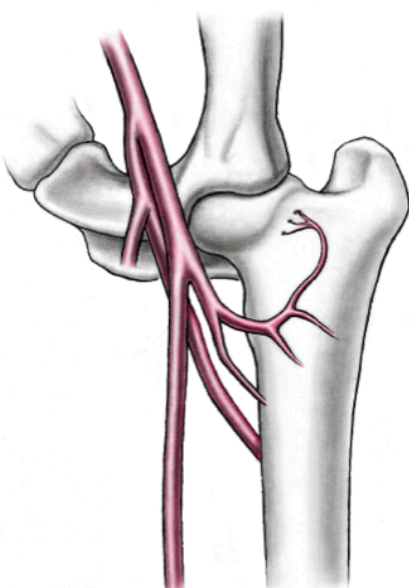


Abbildung 31: Ansicht von kranio-ventral: schematische Darstellung des Verlaufes der A. circumflexa femoris lateralis (ACFL) und korrespondierendes 3D Volumen Rendering (3DVR) des CTA.

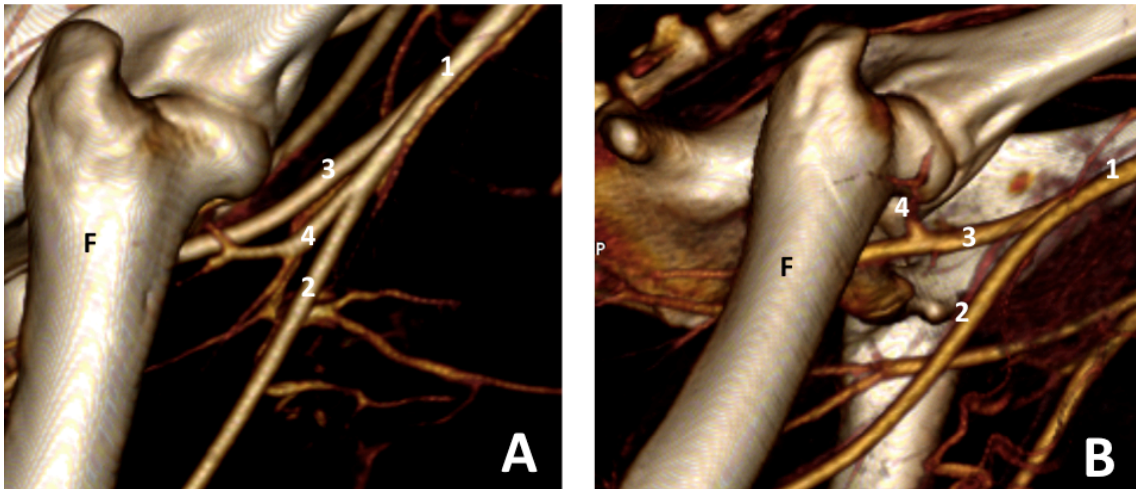


Abbildung 32: CTA 3D Volumen Rendering (3DVR): Darstellung von zwei rechten Hüften, kranio-laterale Ansicht: A: normaler Verlauf der ACFL mit Abgang aus der A. femoralis, B: Variation mit Abgang der ACFL aus der A. profunda femoris, 1: A. iliaca externa, 2: A. femoralis, A. profunda femoris, F: Femur

4.2 Silikoninjektionspräparate

Die Darstellung der Gefäße war mit der verwendeten Methode gut möglich (siehe Abbildung 33). Der Verlauf der Arterien beginnend aus der Abzweigung aus der Aorta bis zum Abgang der ACFL und ACFM entsprachen der Beschreibung (siehe Abbildung 33 und Abbildung 34).

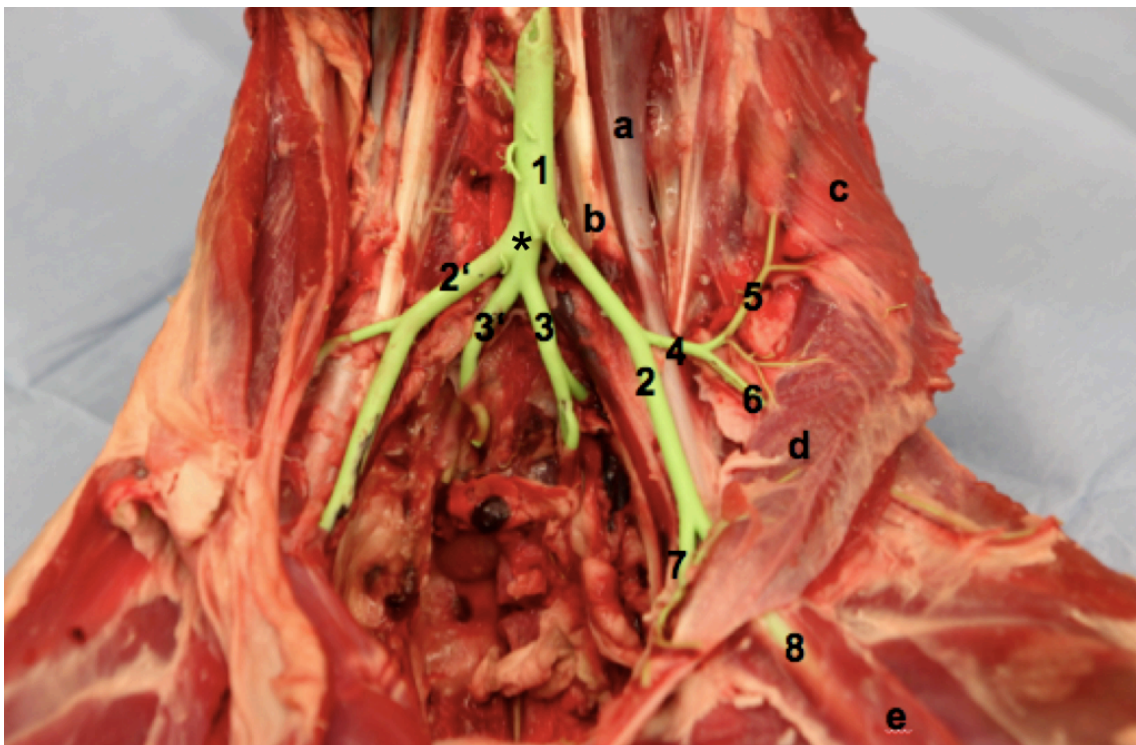


Abbildung 33: Ventralansicht auf eine präparierte Schafhüfte mit silikoninjizierten Gefäßen: A: M. psoas major, b: M. psoas minor, c: M. transversus abdominis, d: M. rectus abdominis, e: M. sartorius 1: Aorta abdominalis, 2,2': A. iliaca externa, 3,3': A. iliaca interna, 4: A. circumflexa ilium profunda, 5: R. kranialis der A. circumflexa ilium profunda, 6: R. kaudalis der A. circumflexa ilium profunda, 7: A. profunda femoris, 8: A. femoralis, * kennzeichnet den Grundstamm (Truncus primitiv)

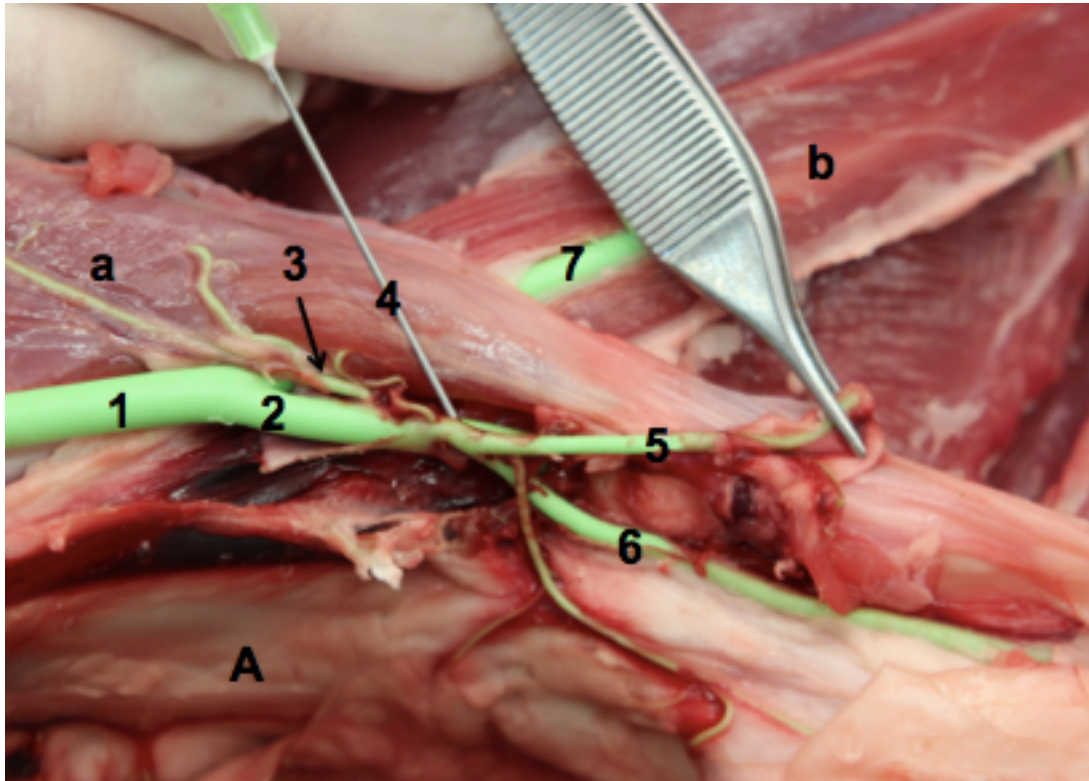


Abbildung 34 Ventromedialansicht: A: Os pubis, a: M. rectus abdominis, b: M. sartorius, 1: A. iliaca externa, 2: A. profunda femoris, 3: A. abdominis kaudalis, 4: Kanülenspitze zeigt auf den Truncus pudendoepigastricus, 5: A. epigastrica kaudalis, 6: A. pudenda externa, 7: A. femoralis

Die A. circumflexa femoris lateralis (ACFL) entsprang aus der A. femoralis und zog als starkes Gefäss von medial kranial an das Hüftgelenk. Diese Aufzweigung wurde vom kranialen Schenkel des M. sartorius bedeckt (siehe Abbildung 35 und Abbildung 36). Die ACFL verlief zwischen dem M. vastus medialis und dem M. rectus femoris kranial an das Hüftgelenk. Dort teilte sie sich in den R. descendens und einen gemeinsamen Truncus, der sich dann in den R. transversus und den R. ascendens aufspaltete (siehe Abbildung 39).

Die ACFL endete in drei grossen Ästen (vgl. Tabelle 3):

- R. descendens
- R. transversus
- R. ascendens

Der R. descendens war der erste Ast, welcher abzweigte. Er verlief als starkes Gefäss nach distal. Dort zog er in den M. quadriceps. Nach dem Abgang des R. descendens konnte zuerst ein gemeinsamer Truncus gesehen werden, welcher sich dann in den R. transversus und den R. ascendens aufteilte. Der R. transversus verlief ebenfalls in den M. quadriceps. Der R. ascendens war der Ast der ACFL, welcher hauptsächlich den Femurkopf versorgte. Er verlief unterhalb vom M. rectus femoris und oberhalb vom M.

iliopsoas. Der R. ascendens verästelte sich stark, wobei er Gefäße an den Schenkelhals abgab und auch noch mit an der Versorgung des M. gluteus medius und minimus sowie des M. quadriceps mitbeteiligt war (siehe Abbildung 37). Er versorgte auch die Fossa trochanterica mit. Der R. ascendens gab ein prominentes Gefäß in die Hüftkapsel und zum Femurkopf ab, das kranial zwischen 10 Uhr und 11 Uhr in den Femurkopf zog (siehe Abbildung 37 und Abbildung 38). Hier wurde das kraniale vaskuläre Retinakulum aus dem R. ascendens der ACFL gebildet (siehe Abbildung 40).

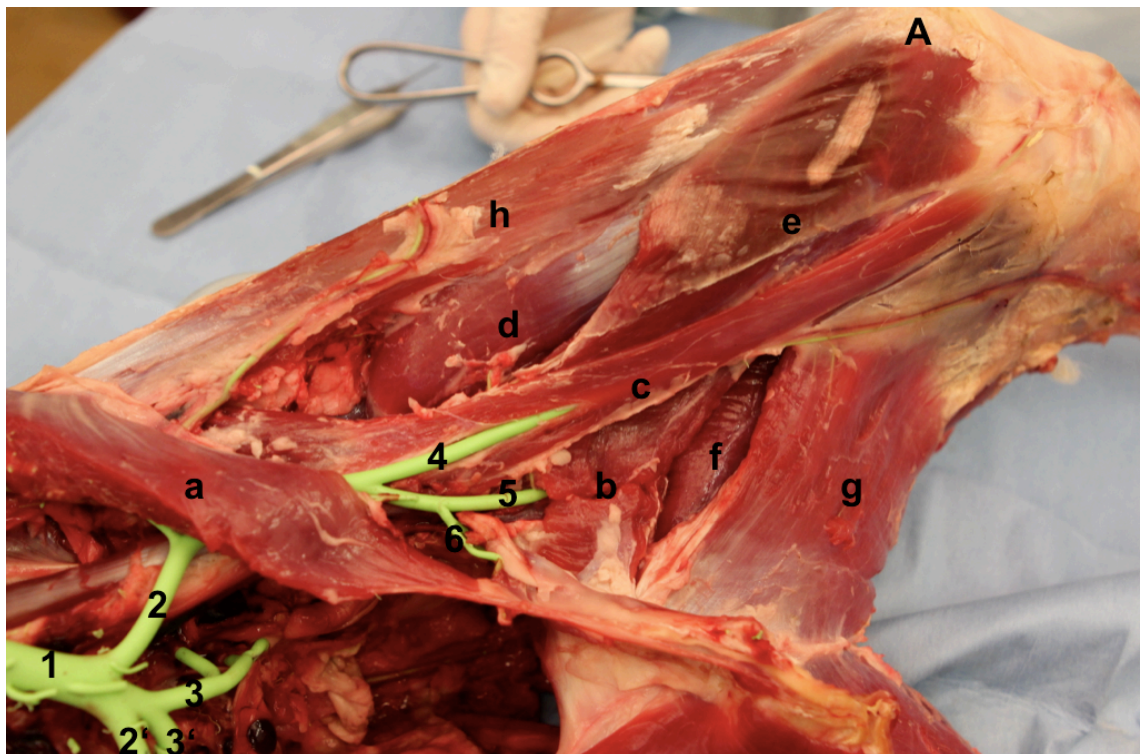


Abbildung 35: Schafpräparat, linke Hüfte von medial: Knie, 1 Aorta, 2, 2': A. iliaca externa, 3,3': A. iliaca interna, 4: A. femoralis, 5: A. profunda femoris, 6: Truncus pudendoepigastricus, a: M. rectus abdominis, b: M. pectineus (durchtrennt), c: M. sartorius, d: M. vastus medialis, e: M. gracilis, g: M. semimembranosus, h: M. tensor fasciae latae

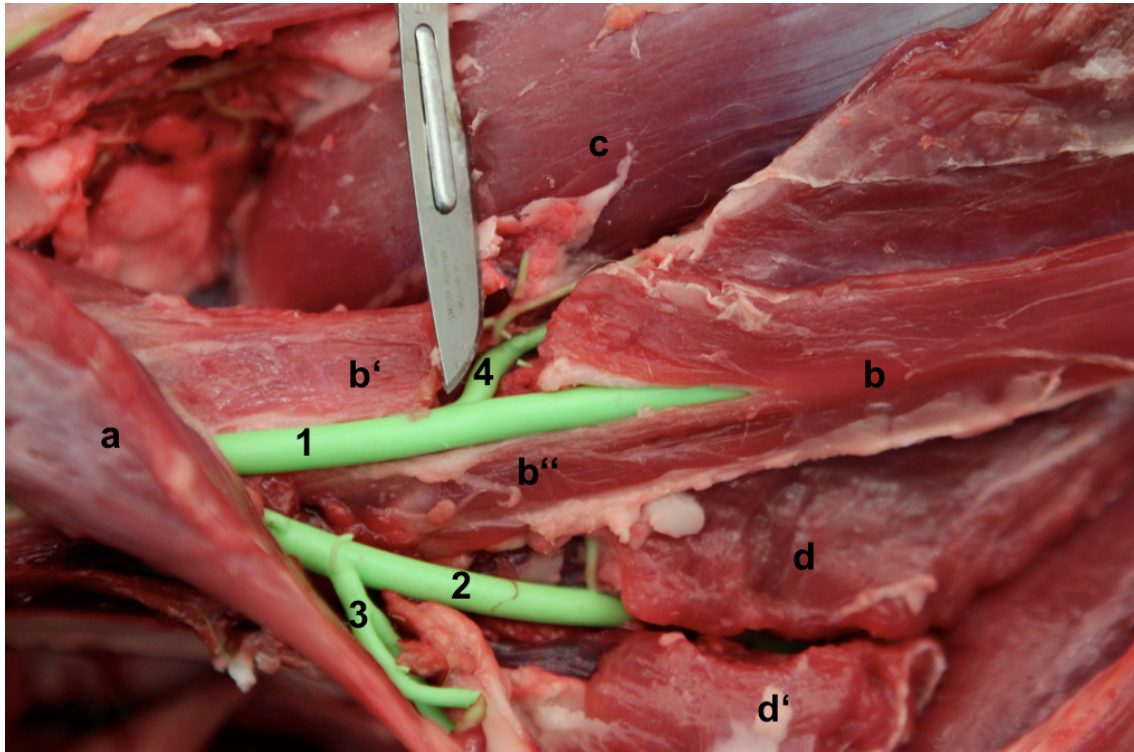


Abbildung 36: Schafpräparat, linke Hüfte von medial: 1: A. femoralis, 2: A. profunda femoris, 3: Truncus pudendoepigastricus, 4: A. circumflexa femoris lateralis (ACFL), a: M. rectus abdominis, b, b', b'': M. sartorius mit kranialer und kaudaler Portion, c: M. vastus medialis, d: M. pectineus (durchtrennt)

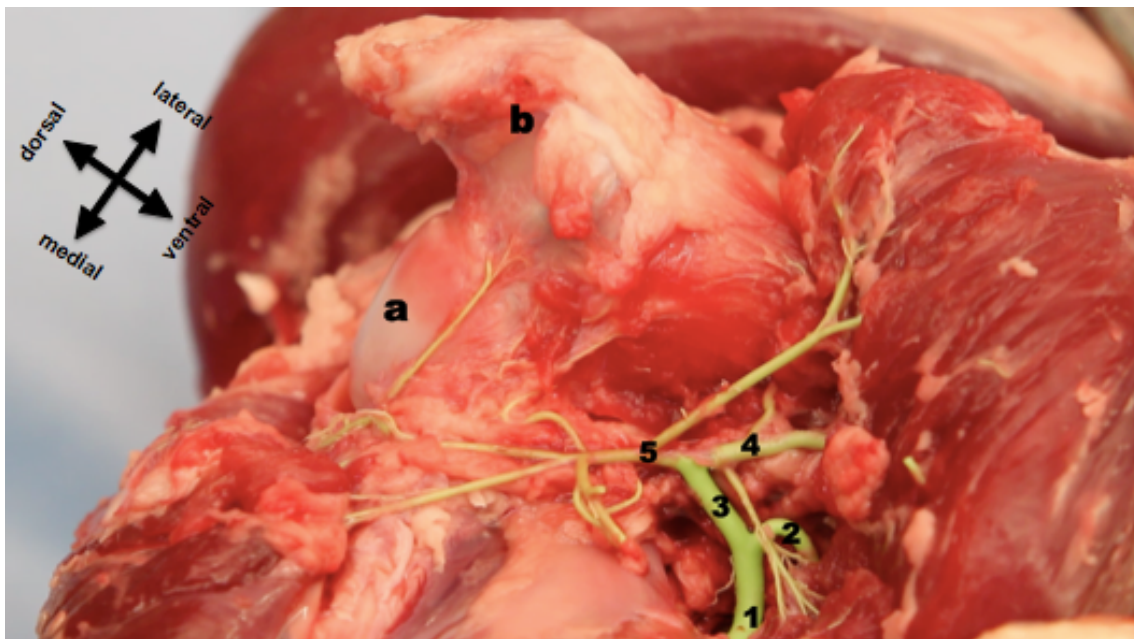


Abbildung 37: Ansicht von kranial auf einen freipräparierten linken Femurkopf vom Schaf: a: Femurkopf, b: Trochanter major, 1: A. circumflexa femoris lateralis (ACFL), 2: R. descendens der ACFL, 3: gemeinsamer Truncus, 4: R. transversus der ACFL, 5: R. ascendens der ACFL

Ast	Verlauf
R. descendens	M. quadriceps
R. transversus	M. quadriceps
R. ascendens	Femurkopf, Fossa trochanterica, Hüftgelenkkapsel

Tabelle 3: Die Äste der Arteria circumflexa femoris lateralis (ACFL) und deren Verlauf

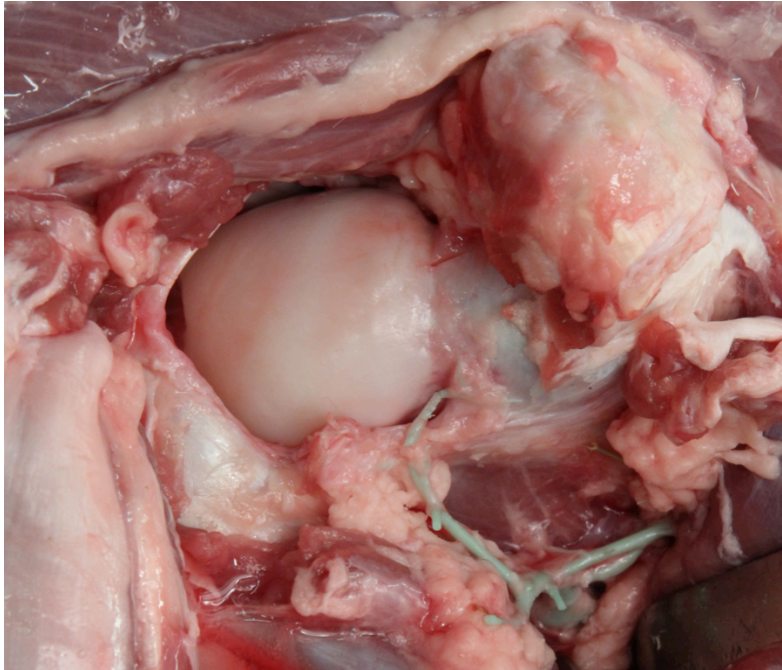


Abbildung 38: Schaf, linkes Hüftgelenk, Ansicht von kranio-dorsal: Eintritt von Endästen des R. ascendens der A. circumflexa femoris lateralis (ACFL) in den Femurkopf.

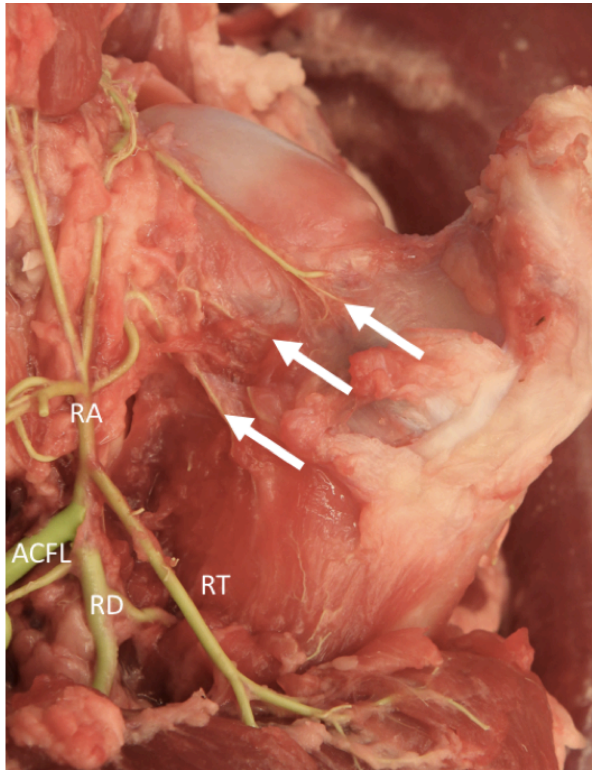


Abbildung 39: Linker Femur vom Schaf, Ansicht von kraniodorsal: ACFL: A. circumflexa lateralis, RD: R. descendens, RT: R. transversus, RA: R. ascendens, Pfeile markieren das vaskuläre Retinakulum.

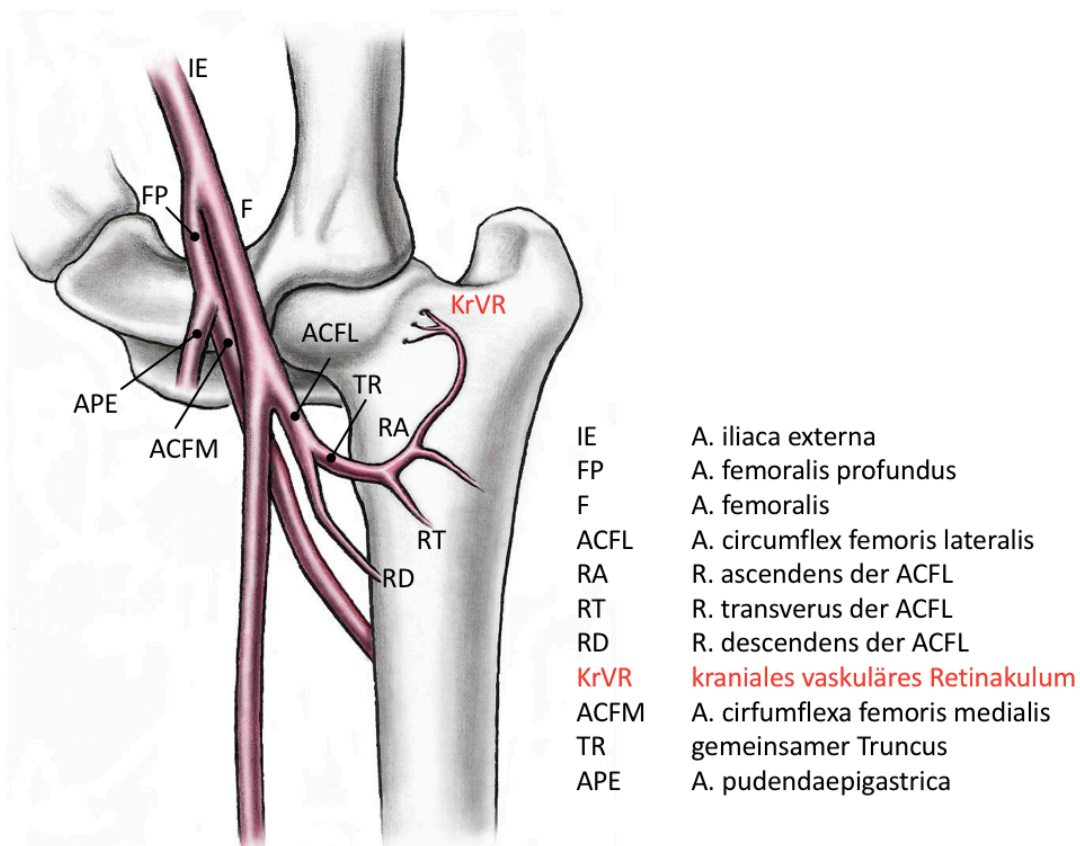


Abbildung 40: Ansicht von kranial: schematische Darstellung der A. circumflexa femoris lateralis und ihrer Rami.

Die A. circumflexa femoris medialis (ACFM) ging kranial der Mm. adductores aus der A. profunda femoris hervor. Beim Schaf bildet sie die funktionelle Fortsetzung der A. profunda femoris. Die A. profunda femoris zieht als sehr dünnes Gefäß weiter distal (siehe Abbildung 41). Die ACFM teilte sich in fünf verschiedenen Äste auf, von denen einer an der vaskulären Versorgung des Femurkopfes beteiligt war (siehe Abbildung 49). Die ACFM entlässt beim Schaf ihre Äste in folgender Reihenfolge (vgl. Tabelle 4):

- R. acetabularis
- R. obturatorius
- R. profundus
- R. ascendens
- R. descendens (transversus)

Der Ramus acetabularis der ACFM zog kranial des M. obturatorius externus im Bereich des Acetabulums an das Hüftgelenk (siehe Abbildung 41).

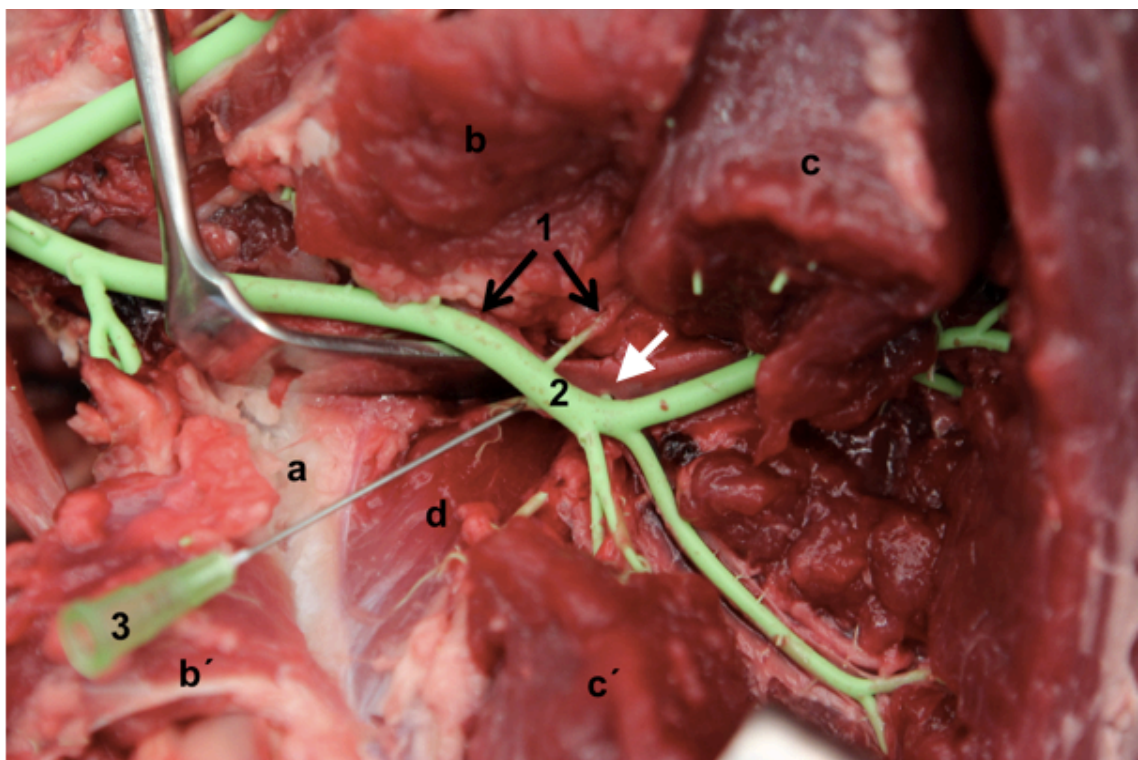


Abbildung 41: a: Os pubis, b, b': M. pectineus, c, c': M. adductores (durchtrennt), d: M. obturatorius externus (durchtrennt), 1: A. profunda femoris, 2: A. circumflexa femoris medialis, 3: Kanülenspitze zeigt auf den R. acetabularis der ACFM, weisser Pfeil: Abzweigung des R. profundus

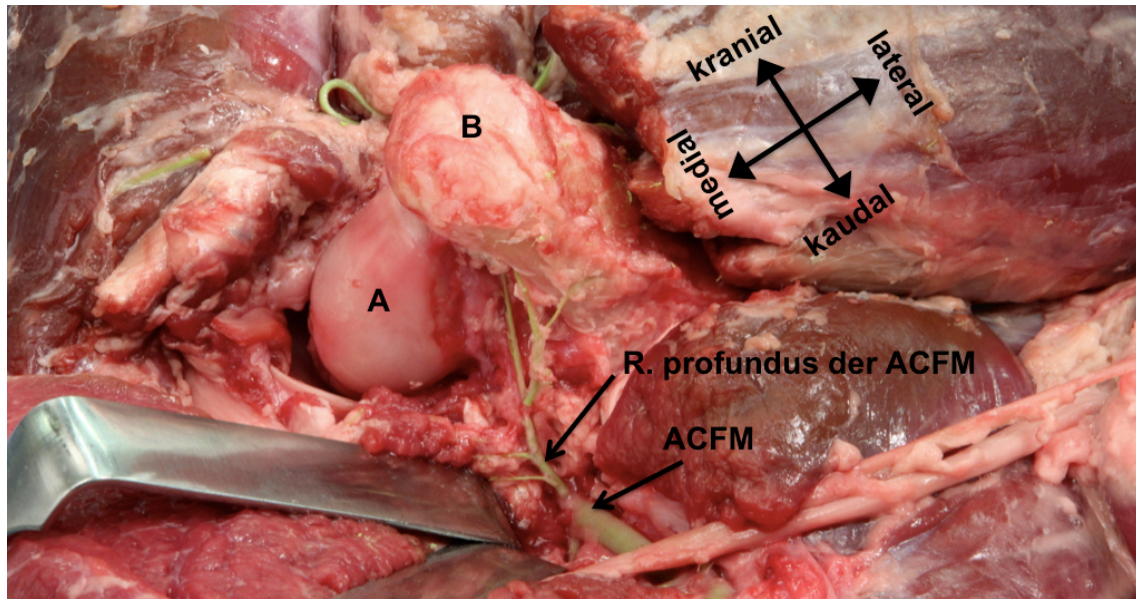


Abbildung 42: Rechte Hüfte Ansicht von dorsokaudal, die Muskeln um das Hüftgelenk wurden abpräpariert: A: Femurkopf, B: Trochanter major

Der R. obturatorius zeigte sich als etwas kräftigerer Ast als die Rr. acetabularis und profundus. Er teilte sich kurz nach seinem Ursprung, der vom M. pectineus bedeckt wurde, in mehrere Äste (siehe Abbildung 43 und Abbildung 44).

Der R. ascendens zeigte sich als kräftiges Gefäß, das zusammen mit dem R. descendens die Endaufspaltung der ACFM bildet (siehe Abbildung 44).

Der R. descendens ist der stärkste Ast der ACFM. Er durchsticht den M. adductor und gibt kleine Ästchen zu dessen Versorgung ab. Der R. descendens zieht weiter kaudal bis zwischen den M. semimembranosus und den M. semitendinosus, diese beiden Muskeln werden durch zahlreiche Verästelungen des R. descendens versorgt.

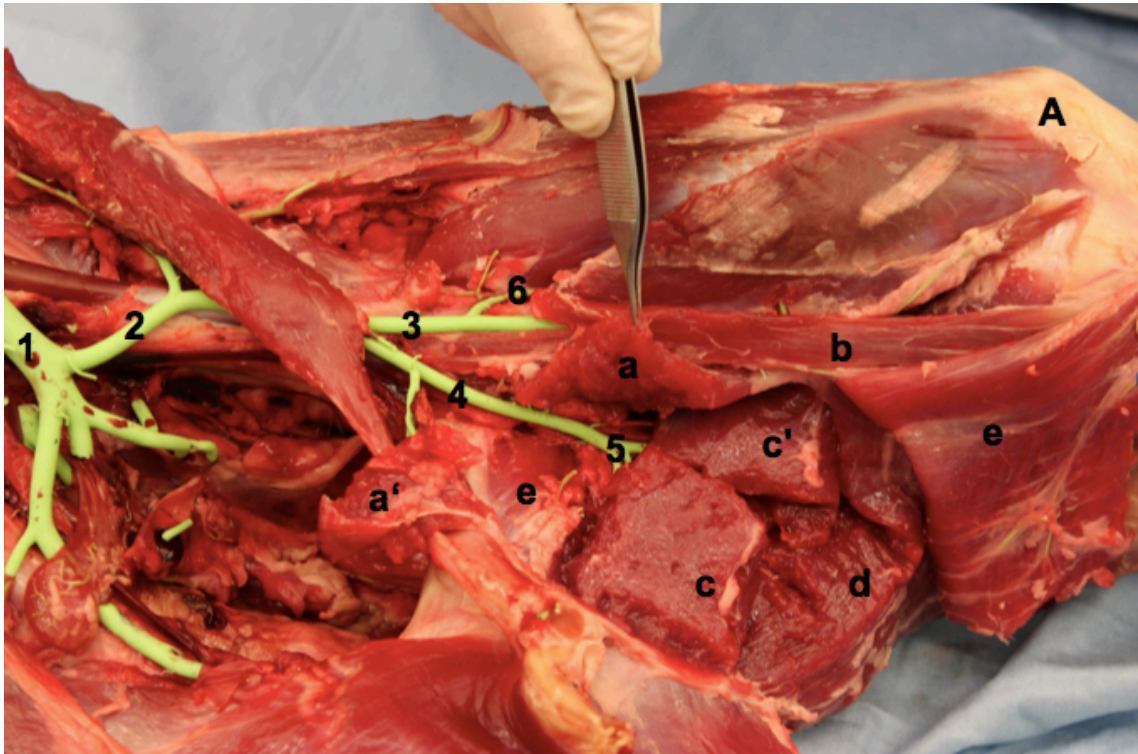


Abbildung 43: Schaf, linke Hüfte von medial: A Knie: 1: Aorta, 2: A. iliaca externa, 3: A. femoralis, 4: A. profunda femoris, 5: ACFM, 6: ACFL, a, a': M. pectineus (durchtrennt), b: M. sartorius, c, c': Mm. adductores (durchtrennt), d: M. semimembranosus, e: M. obturatorius externus

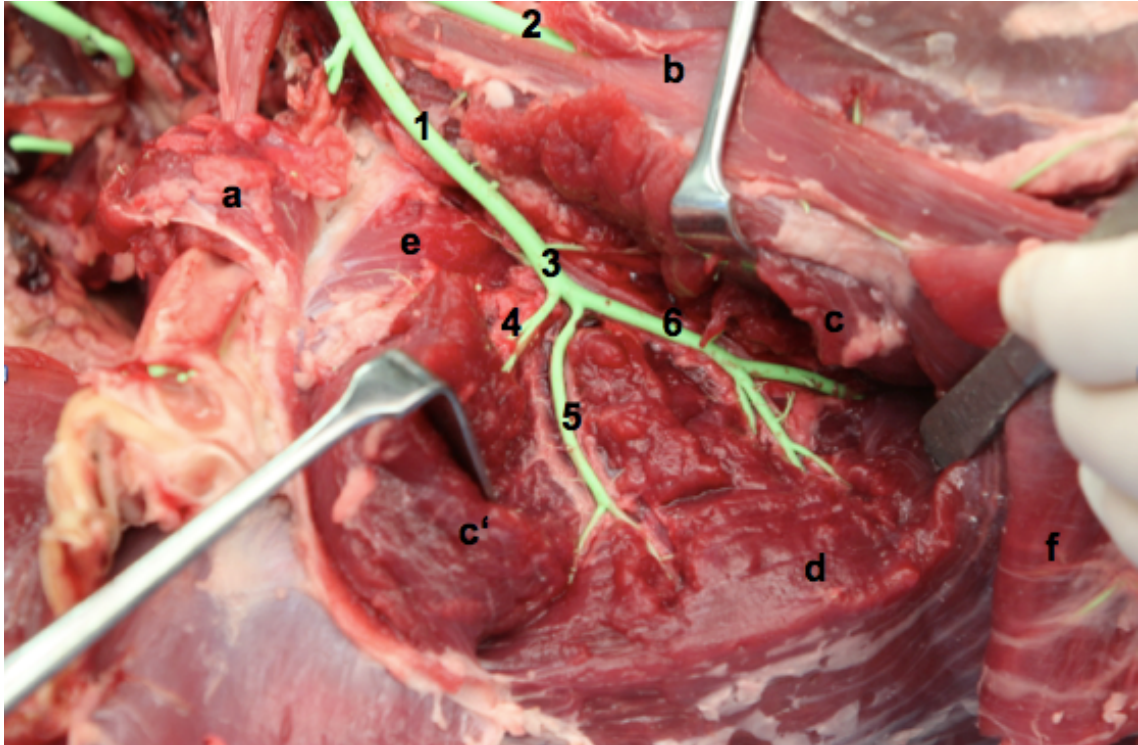


Abbildung 44: Schaf: linke Hüfte von medial: 1: A. profunda femoris, 2: A. femoralis, 3: ACFM, 4: R. obturatorius der ACFM, 5: R. ascendens der ACFM, 6: R. descendens der ACFM, a, a': M. pectineus (durchtrennt), b: M. sartorius, c, c': Mm. adductores (durchtrennt), d: M. semimembranosus, e: M. obturatorius externus, f: M. gracilis (zur Seite geklappt)

Der R. profundus zweigte lateral aus der ACFM ab und zog mit mehreren feinen Verästelungen von kaudal an das Hüftgelenk und durchstach auf diesem Weg die Adduktorenmuskulatur (siehe Abbildung 42 und Abbildung 48). Sein Weg verlief unterhalb des M. quadratus femoris und am lateralen Rand des M. gemelli entlang bis zu dessen Ansatzsehnen in der Fossa trochanterica (siehe Abbildung 45 und Abbildung 46). Er gab einen Ast an den M. quadratus femoris ab, zog weiter dorsal und gab einen weiteren Ast ab. Dieser teilt sich in mindestens zwei Anteile, wobei ein Anteil von kaudal und der andere Anteil von kranial an den Trochanter major zog (s. Abbildung 47). Die kranial verlaufenden Anteile überkreuzten die Endsehne des M. gemelli und gaben auch Anteile an den M. gluteus medius ab. Ein weiterer Ast des R. profundus zog weiter dorsokranial und unterkreuzte die Sehne des M. gemelli. Dieser Ast teilte sich wiederum auf und zog mit einem Abgang in den M. obturatorius externus. Der andere zog in die Fossa trochanterica. Der letzte Abgang zog am Femurkopf-/halsübergang dorsokaudal in das Hüftgelenk hinein. Das kaudale vaskuläre Retinakulum wurde von Endästen des R. profundus der ACFM gebildet. Die Silikoninjektionspräparate ermöglichten eine Visualisierung der Gefäßaufzweigungen ab der Aorta bis hin zu den kranialen und kaudalen vaskulären Retinacula (siehe Abbildung 50).

Bei der Präparation der Silikoninjektionspräparate konnten keine Gefäße im dorsalen Bereich des Femurkopf-/halsübergangs festgestellt werden (siehe Abbildung 48).

Ast	Verlauf
R. obturatorius	Kaudal des M. obturatorius externus an das Hüftgelenk
R. ascendens	Tuber ischiadicum, Adduktoren, lange Sitzbeinmuskulatur
R. acetabularis	Acetabulum
R. descendens (transversus)	M. adductor, M. semimembranosus, M. semitendinosus
R. profundus	Femurkopf, Trochanter major, M. quadratus femoris, M. gluteus medius, M. obturatorius externus

Tabelle 4: Die Äste der A. circumflexa femoris medialis (ACFM) und deren Verlauf.

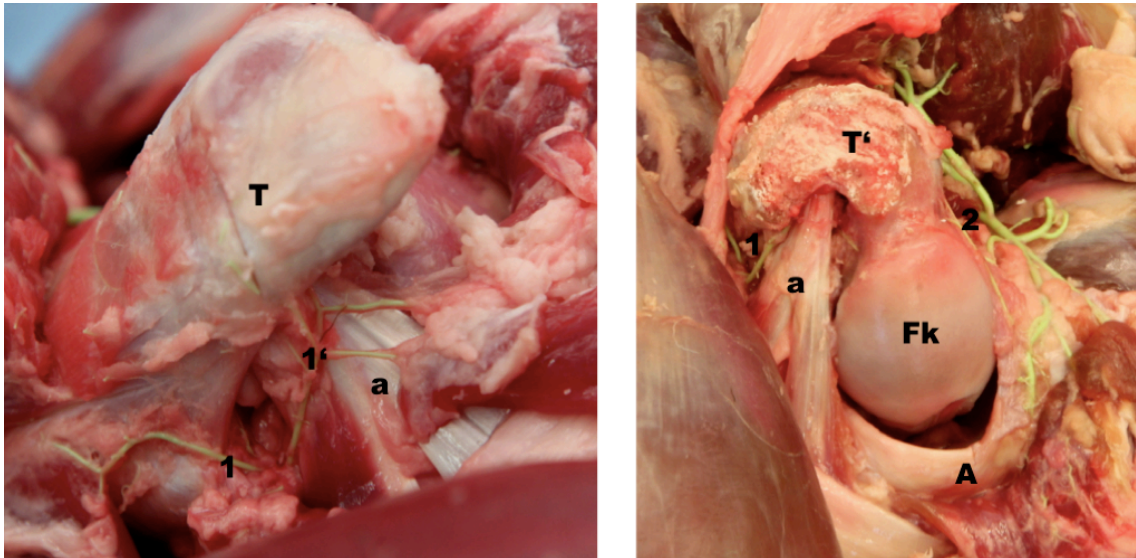


Abbildung 45: Schaf linke Hüfte von kaudo-dorsal (links) und von dorsal (links): T: Trochanter, T': Stumpf des abgesetzten Trochanter major, Fk: Femurkopf, A: Acetabulum, a: M. gemelli, 1,1': Äste des R. profundus der A. circumflexa femoris medialis (ACFM), 2: Äste des R. ascendens der A. circumflexa femoris lateralis (ACFL)

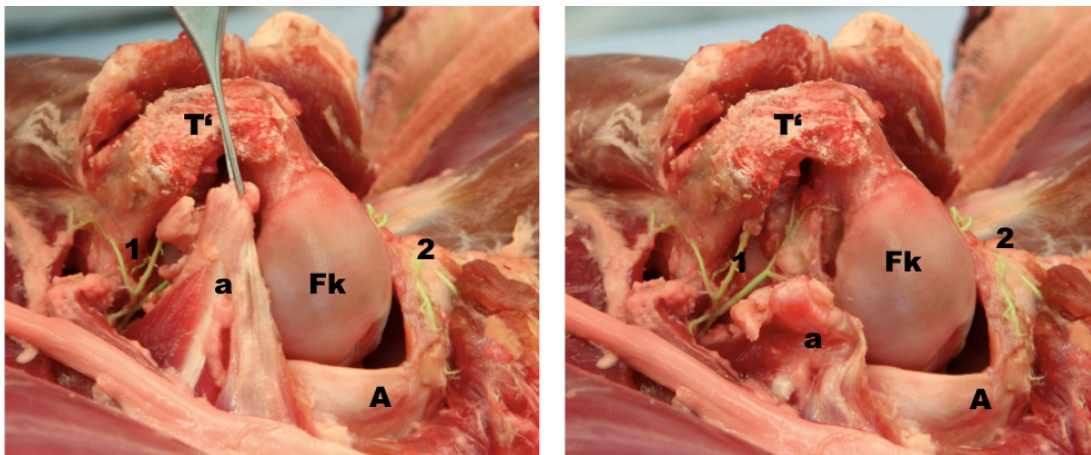


Abbildung 46: Schaf linke Hüfte von kaudo-dorsal: T': Stumpf des abgesetzten Trochanter major; Fk: Femurkopf, A: Acetabulum, a: M. gemelli, 1: Äste des R. profundus der A. circumflexa femoris medialis (ACFM), 2: Äste des R. ascendens der A. circumflexa femoris lateralis (ACFL)

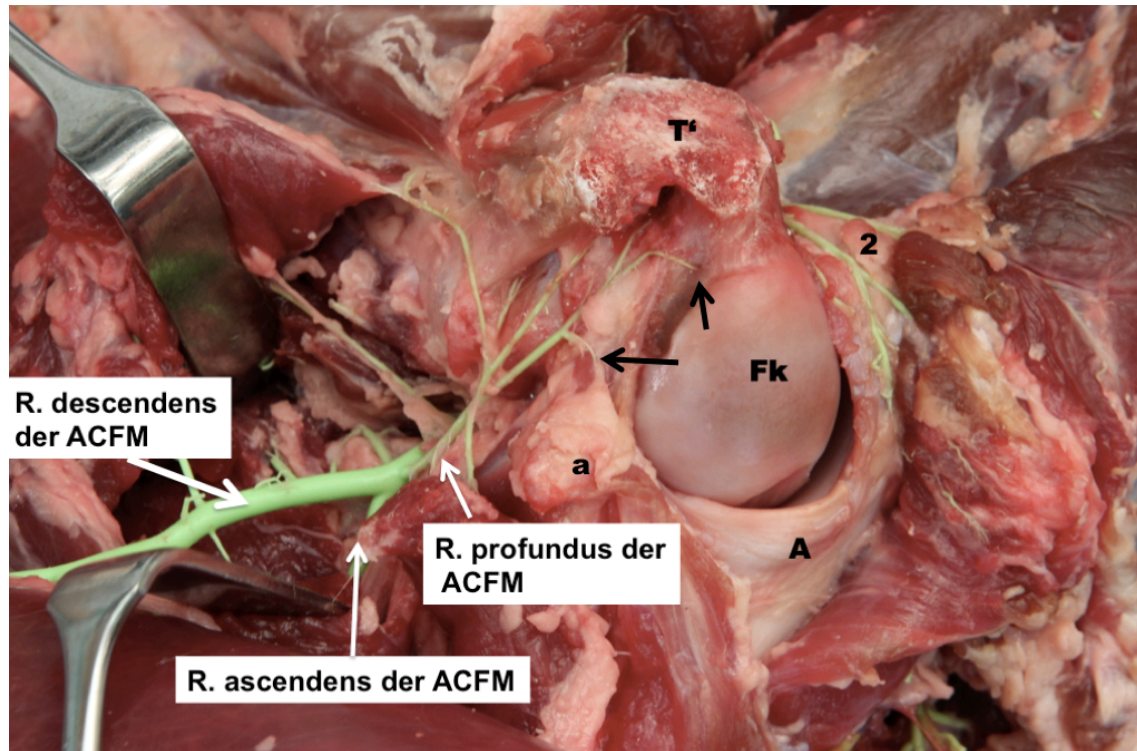


Abbildung 47: Schaf linke Hüfte von kaudo-dorsal: T': Stumpf des abgesetzten Trochanter major, Fk: Femurkopf, A: Acetabulum, a: M. gemelli (abpräpariert), 2: Äste des R. profundus der ACFM, schwarze Pfeile: kaudales vaskuläres Retinakulum

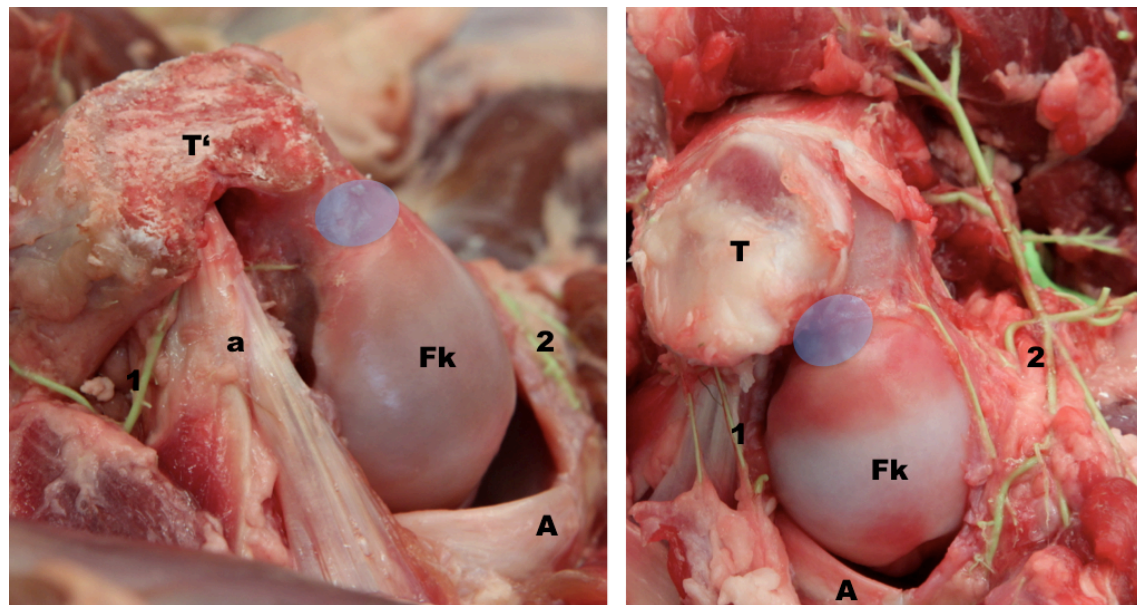


Abbildung 48: Schaf linke Hüfte Ansicht von kaudo-dorsal und dorsal: Die blau gekennzeichnete Region entspricht dem Gebiet, das bei einer Off-Set Korrektur des Cam-Impingement betroffen ist: T: Trochanter major, T': Stumpf des abgesetzten Trochanter major, Fk: Femurkopf, A: Acetabulum, a: M. gemelli, 1: Äste des R. profundus der A. circumflexa femoris medialis (ACFM), 2: Äste des R. ascendens der A. circumflexa femoris lateralis (ACFL)

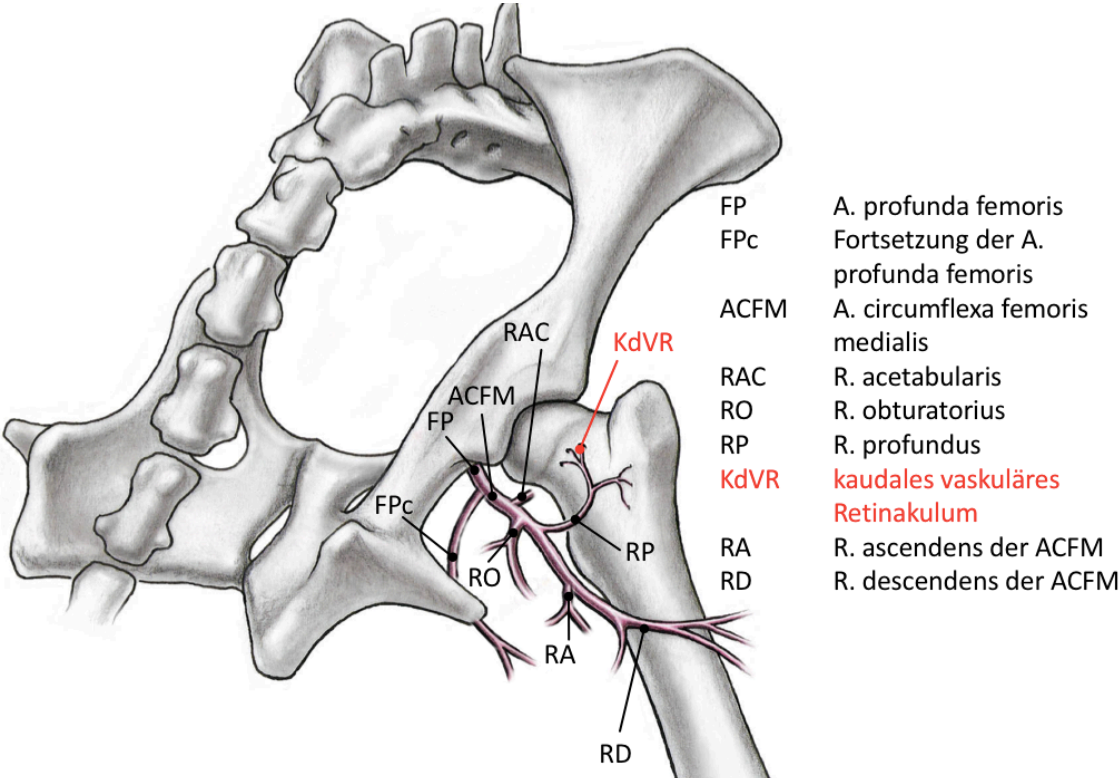


Abbildung 49: Schaf: Ansicht von kaudal: schematische Darstellung der A. circumflexa femoris medialis und ihrer Rami.

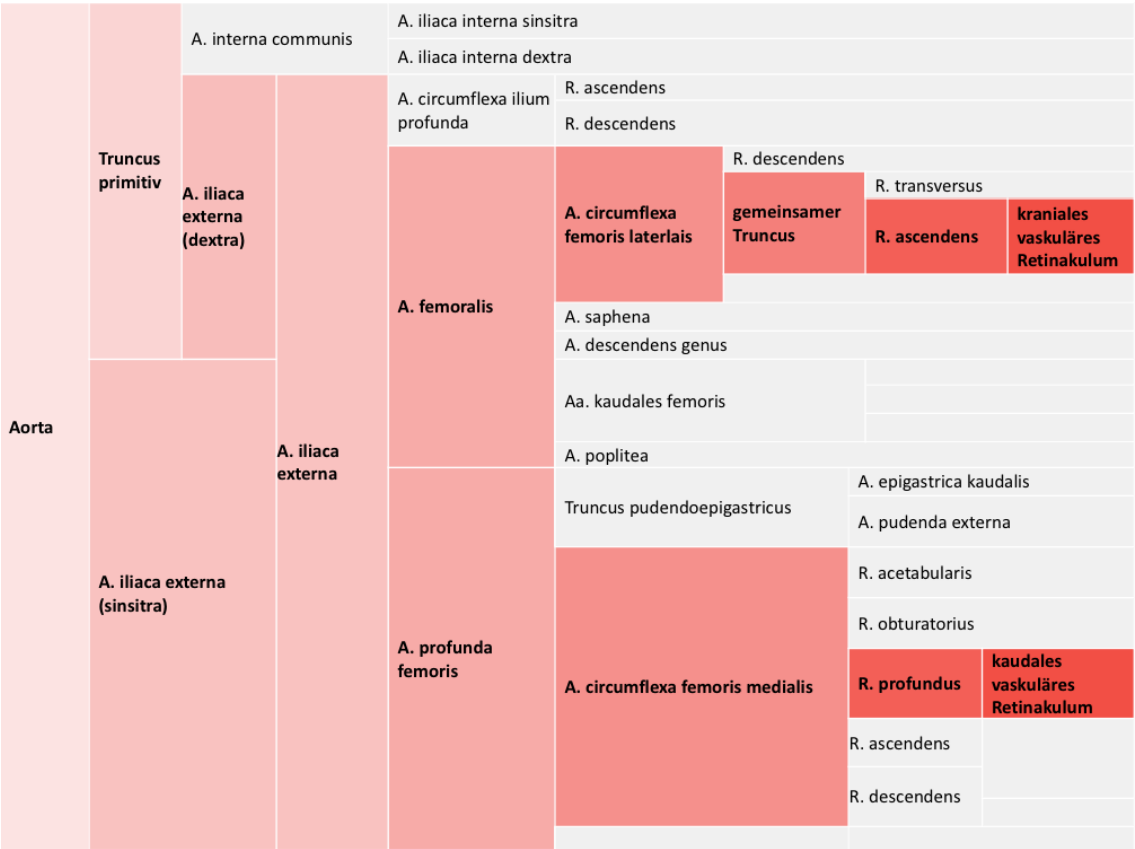


Abbildung 50: Gefäßbaum zur Beschreibung der Blutversorgung des Femurkopfes beim Schaf beginnend an der Aufzweigung der Aorta abdominalis.

4.3 Korrosionspräparate

Eines der drei Korrosionspräparate war durch die Mazeration zerfallen und konnte daher nicht ausgewertet werden. Zwei Korrosionspräparate (vier Femora) konnten visuell ausgewertet werden. Mit den Korrosionspräparaten konnte der Gefäßverlauf bis in die Tiefen des Femurkopfes nachvollzogen werden (siehe Abbildung 56). Der Gefäßverlauf konnte wie folgt nachgewiesen werden: Von kranial zog die A. circumflexa femoris lateralis mit ihrem R. ascendens mindestens an einer Stelle in den Femurkopf (siehe Abbildung 51, Abbildung 52 und Abbildung 55). Der R. ascendens teilte sich in viele sehr feine Endäste, die zwischen 5 und 11 Uhr in den Femurkopf/halsübergang einzogen (siehe Abbildung 51). Der prominenteste Eintrittspunkt lag zwischen 10 und 11 Uhr. Dieser war an allen Präparaten sichtbar. Die feinen Endäste stellten sich nicht immer dar.



Abbildung 51: Schaf, linker Femur eines Korrosionspräparates von kranial: Sagittal aufgesägt.

Der R. profundus der A. circumflexa femoris medialis zog von kaudal an zwei bis vier Stellen in den Femurkopf und an mindestens drei Stellen in die Fossa trochanterica ein (siehe Abbildung 53 und Abbildung 54).

Bei der Auswertung der Korrosionspräparate konnten wir in dem von einer Off Set Korrektur betroffenen Areal keine Gefäße nachweisen (siehe Abbildung 57, Abbildung 58 und Abbildung 59).

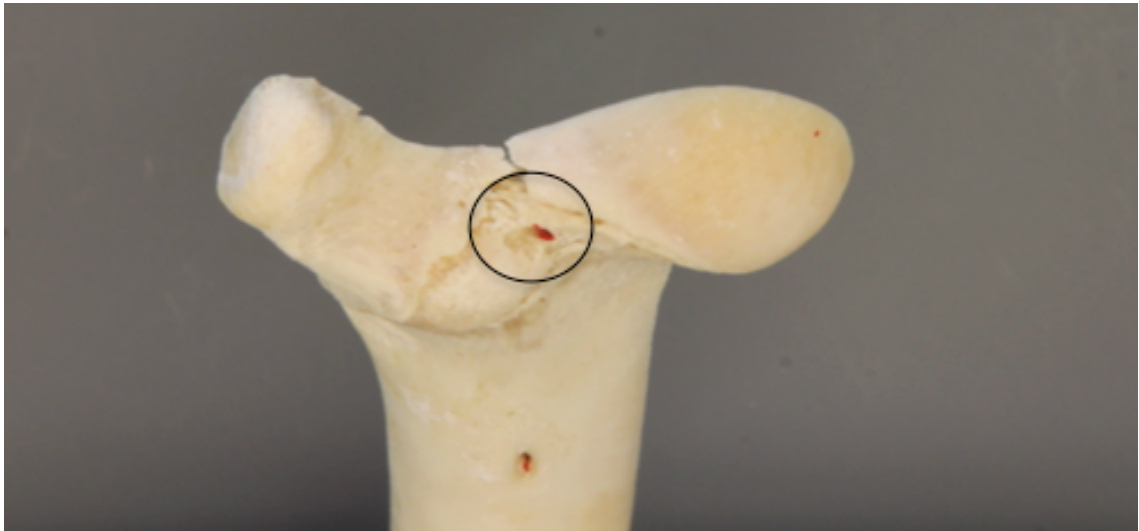


Abbildung 52: Schaf, rechter Femur eines Korrosionspräparates von kranial: Der Kreis markiert die Eintrittsstelle der A. circumflexa femoris lateralis ACFL) in den Femurkopf/-hals Übergang.



Abbildung 53: Schaf linker Femur von kaudal: Pfeile zeigen auf die Eintritte in den Femurkopf/-halsübergang der Arteria circumflexa femoris medialis (ACFM)

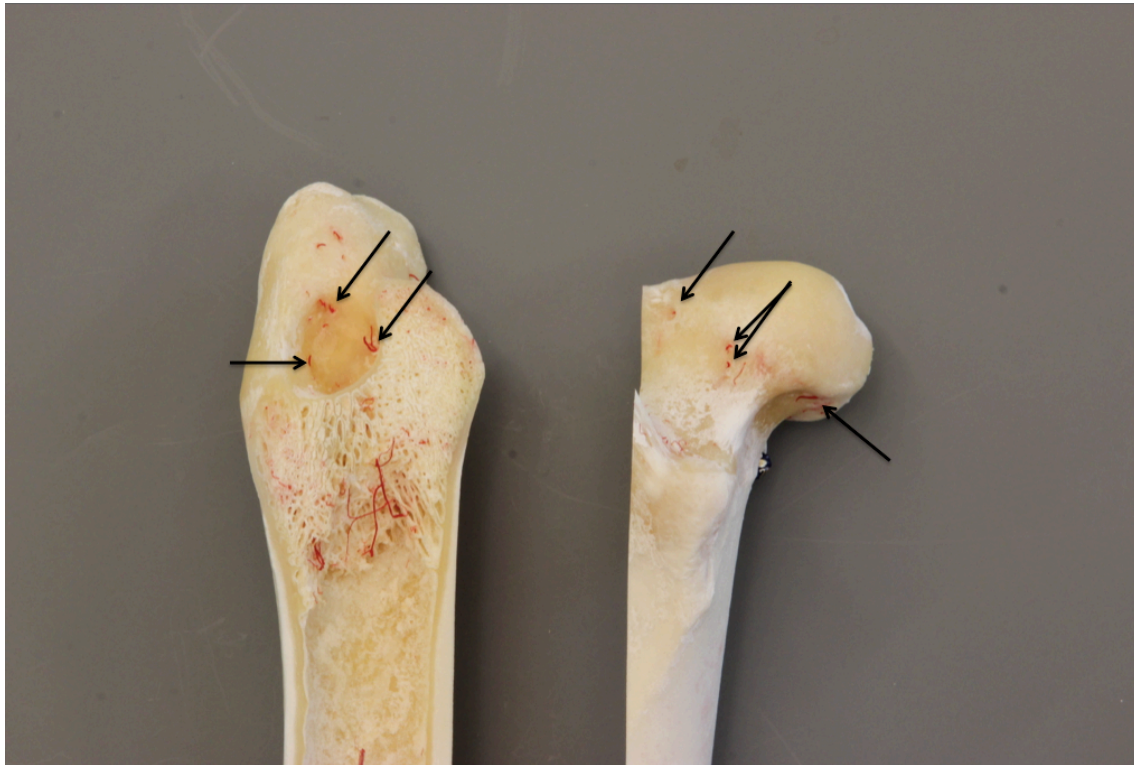


Abbildung 54: Linker Femur, längs aufgeschnitten; Anteil mit Femurkopf von kaudal, Anteil mit Trochanter von medial; Pfeile markieren die Eintritte des R. profundus der Arteria circumflexa femoris medialis (ACFM) in die Fossa trochanterica und in den Femurkopf-/halsübergang.

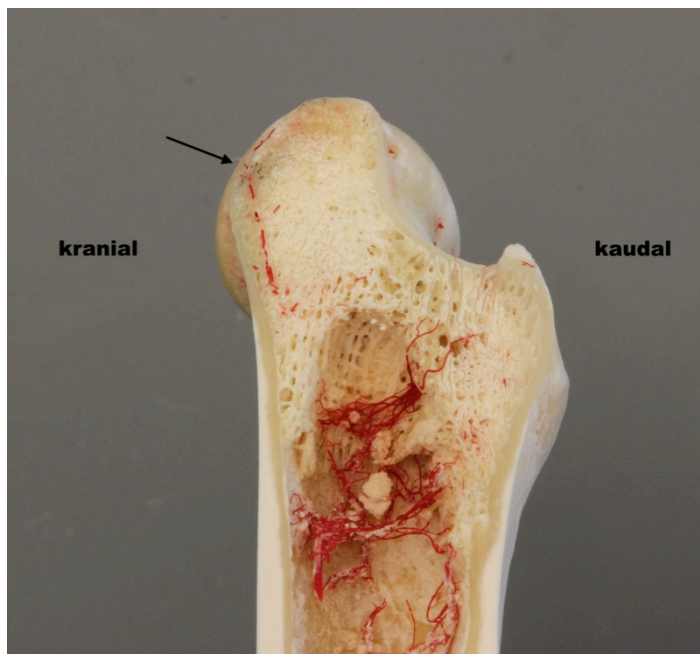


Abbildung 55: Linker Femurkopf, sagittal auf Höhe der Fossa trochanterica aufgesägt. Der schwarze Pfeil markiert die Stelle an der der R. ascendens der ACFL in den Femurkopf einzieht.

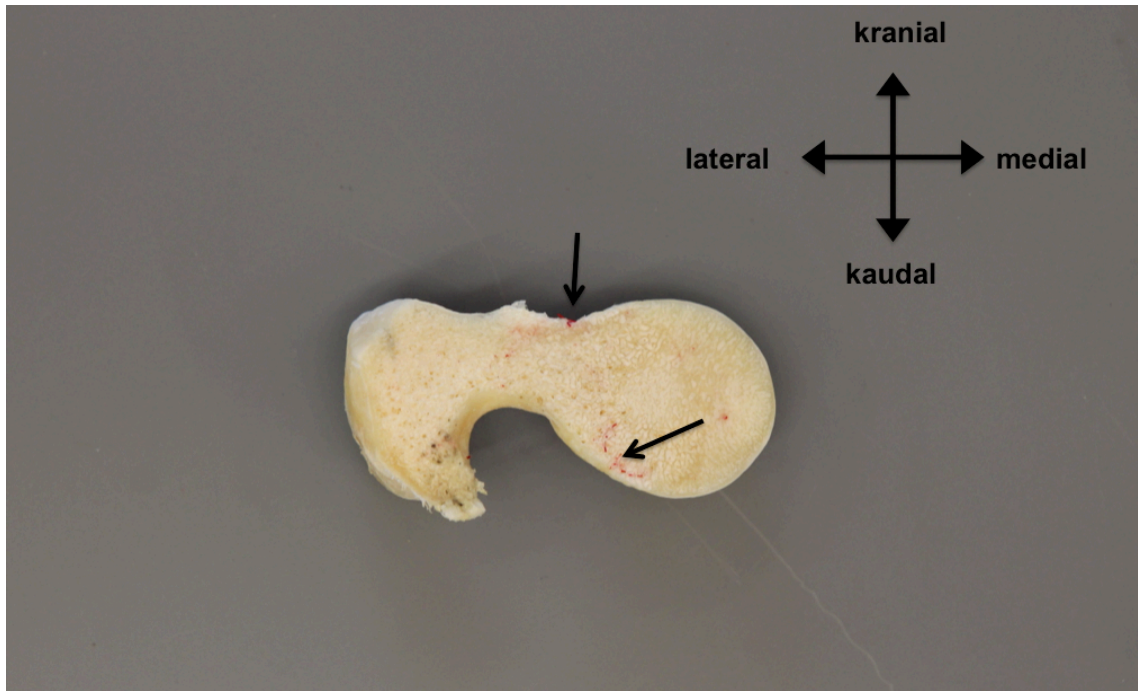


Abbildung 56: Ansicht von dorsal auf einen linken Femur, horizontaler Schnitt durch den Femurkopf/-halsübergang; schwarze Pfeile markieren die Eintrittsstellen der Gefäße in den Femurkopf.

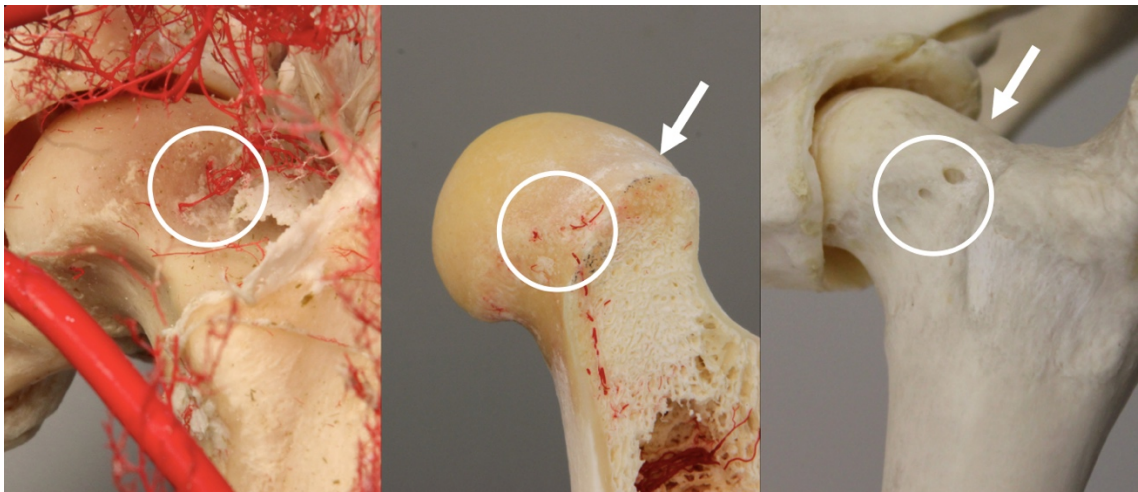


Abbildung 57: Schaf: linker Femur von kranial: die Kreise markieren die Eintrittsstellen der Arteria circumflexa femoralis lateralis (ACFL) in den Femurkopf/-halsübergang. Die Pfeile zeigen auf die Stelle, an der eine Off-Set Korrektur durchgeführt werden würde. (mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. med. Moritz Tannast, Inselspital Bern, Schweiz)

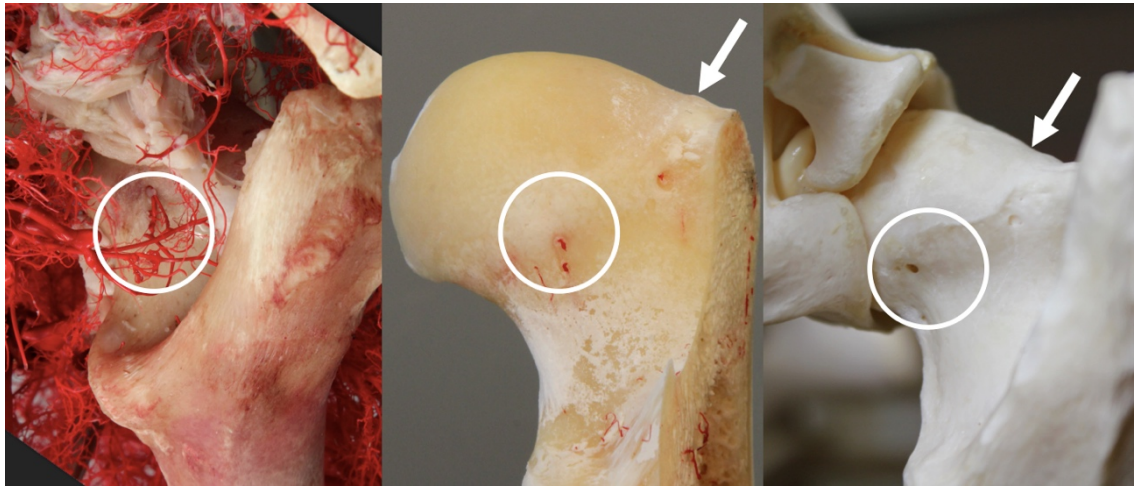


Abbildung 58: Schaf: rechter Femur von kaudal: die Kreise markieren die Eintrittsstellen der Arteria circumflexa femoralis medialis (ACFM) in den Femurkopf-/ halsübergang. Die Pfeile zeigen auf die Stelle, an der eine Off-Set Korrektur durchgeführt werden würde. (mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. med. Moritz Tannast, Inselspital Bern, Schweiz)



Abbildung 59: Linker Femur im Sagittalschnitt durch den Kopfhalsübergang: Der von einer Off-Set Korrektur betroffene Anteil befindet sich oberhalb der gestrichelten Linie.

4.4 Zählung und Verteilung der vaskulären Foramina

Im Bereich des Übergangs von Femurkopf zu Femurhals wurden 4-15 Foramina (Durchschnitt 9.2) pro Femur mit einem Durchmesser von mehr als 0.4 mm gezählt. Zwischen 9 und 12 Uhr konnten durchschnittlich 3.75 Foramina gefunden werden, was 40.77 % aller Foramina entsprach (siehe Abbildung 60).

Die Abschnitte zwischen 1 und 2 Uhr und zwischen 4 und 5 Uhr waren mit 15.76% und 11.96% aller Foramina besonders gefässreich, ebenso der Sektor zwischen 9 und 10 Uhr

(19.2%). Die Gefässdichte nahm zwischen 10 und 12 Uhr weiter ab. Sie sank im Abschnitt zwischen 10 und 11 Uhr auf 12.5% und dann weiter auf 9.25% im Abschnitt zwischen 11 und 12 Uhr.

Dorsal zwischen 9 Uhr und 3 Uhr befanden sich 68.48% der Foramina. Der Anteil an Foramina zwischen 11 Uhr und 1 Uhr lag bei 14.13%. 4.89% der gezählten Foramina wurden zwischen 12 und 1 Uhr gefunden.

Mit 48.37% lag fast die Hälfte aller Foramina zwischen 8 Uhr und 12 Uhr. Zwischen 5 Uhr und 8 Uhr befanden sich nur 9.24% aller vaskulären Foramina.

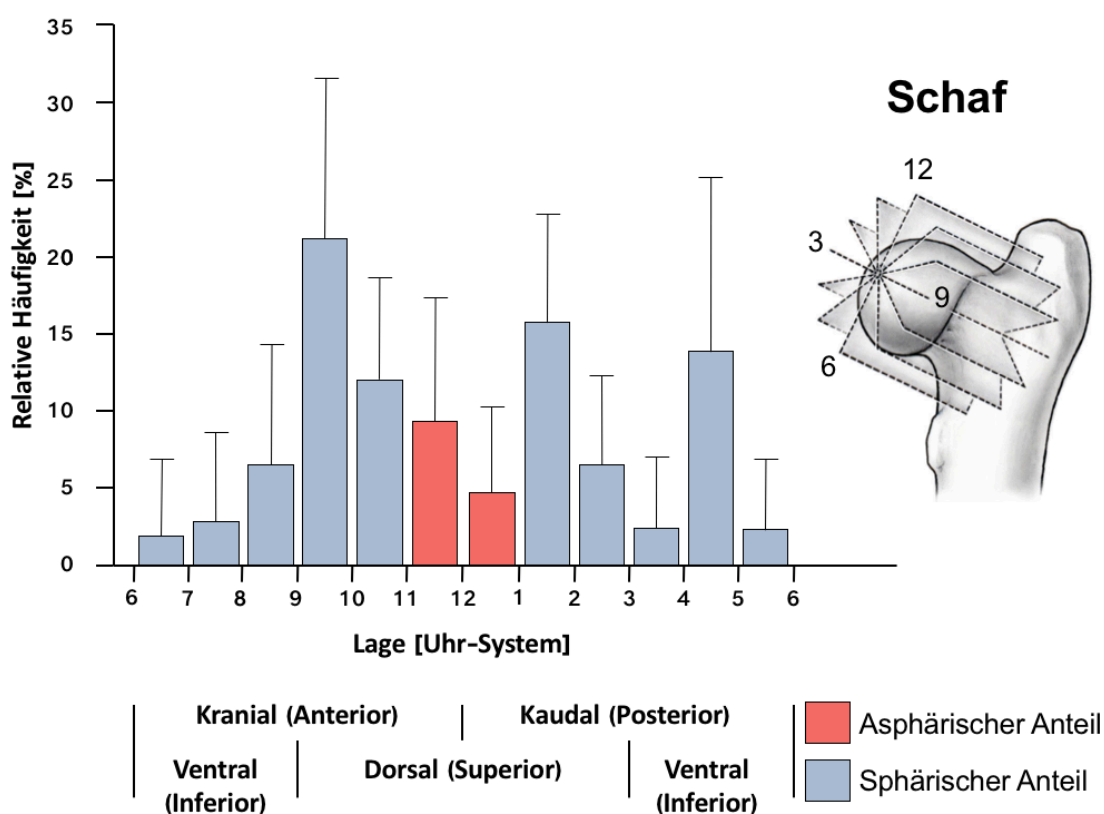


Abbildung 60: Die Grafik stellt die Verteilung der vaskulären Foramina im Bereich des Übergangs Femurkopf zu Femurhals dar. Analytierte Fläche: 10mm distal des Randes der Gelenkfläche. Der aspärische Anteil des Femurkopf-/ halsanteils ist rot markiert.

4.5 MRI

Von den insgesamt 20 untersuchten Hüften erhielten 9 eine Off Set Korrektur und hatten somit ein erhöhtes Risiko, eine avaskuläre Femurkopfnekrose zu entwickeln. Alle 20 Hüften wurden visuell ausgewertet. Die 11 Kontrollhüften sowie die 9 Risikohüften wurden alle mit einem Stadium 0 der ARCO Klassifizierung bewertet.

5 Diskussion

Das ovine FAI Model ist ein schon etabliertes Model um FAI Läsionen vom Cam-Typ zu induzieren. Bei den im Schafmodell experimentell indirekt verursachten Läsionen konnte in dieser Studie ein signifikanter Schaden und degenerative Veränderungen von Knorpel und Labrum an den korrespondierenden Stellen des Acetabulums in vivo gezeigt werden. Beim Menschen wurde ein Zusammenhang zwischen Cam Veränderung des Femurkopf/-halsübergangs und der Lokalisation an welcher der chondrolabrale Schaden auftritt schon gezeigt^{11,15,17,55-58}.

Das ovine FAI Model stellt eine experimentelle Plattform dar, die das Potential hat, klinische relevante Fragen im Zusammenhang mit FAI zu lösen. Um auch für Fragen zur Behandlung des FAI genutzt werden zu können, muss eine komplikationslose Osteochondroplastik durchführbar sein, welche die femurkopfversorgenden Gefäße nicht verletzt. Beim Menschen wurde in verschiedenen Studien eine effektive und sichere Durchführung der Osteochondroplastik, unter Schonung der vaskulären Retinakuli, belegt⁵⁹⁻⁶². Hierfür ist es wichtig, den genauen topographischen Verlauf dieser Gefäße zu kennen. Ziel dieser Arbeit war es festzustellen ob eine Osteochondroplastik zur Korrektur eines Cam-FAI beim Modelltier Schaf durchgeführt werden kann, ohne die femurkopfversorgenden Gefäße zu verletzen und so eine iatrogene avaskuläre Femurkopfnekrose zu induzieren. Dafür wurden mit vier verschiedenen Methoden die Gefäße identifiziert, die den Femurkopf beim Schaf versorgen und deren topographischer Verlauf beschrieben.

Mit Hilfe von CTAs wurde der Verlauf, sowie die Symmetrie der großen Gefäße überprüft. Die Identifikation der femurkopfversorgenden Gefäße, sowie deren topographischer Verlauf, wurde mit Silikoninjektionspräparaten und Korrosionspräparaten durchgeführt. Mit der Zählung der vaskulären Foramina am Femurkopf/-halsübergang und deren Verteilung wurde ein Überblick über die Eintrittsstellen der Gefäße am Femurkopf gegeben. Zum Schluss wurde in vivo bei zehn Schafen eine Varisationsosteotomie durchgeführt und an neun von ihnen eine Korrektur des induzierten Cam - FAI durchgeführt. Nach 140 Tagen wurde mittels MRI überprüft, ob eine avaskuläre Femurkopfnekrose vorlag.

Durch die Präparation der silikoninjizierten Hüften und die Analyse der Korrosionspräparate wurden zwei Gefäße identifiziert, welche hauptsächlich für die

Blutversorgung des ovinen Femurkopfes verantwortlich sind. Von kranial wurde der Femurkopf von Anteilen des R. ascendens der ACFL versorgt. Die vaskuläre Blutversorgung von kaudal wurde vom R. profundus der ACFM gesichert. Die Blutversorgung des Femurkopfes beim Schaf beginnt auf Höhe der Aufteilung der Aorta abdominalis entsprechend dem Menschen, mit dem Unterschied, dass Schafe keine A. iliaca communis besitzen^{47,49}. Die Aufzweigung der A. iliaca externa aus der Aorta lag nur bei drei CTAs mit im Aufnahmebereich. Diese drei zeigten alle eine Seitenasymmetrie. Links entsprang die A. iliaca externa direkt aus der Aorta, rechts hingegen bildete die A. iliaca externa zusammen mit der A. iliaca interna communis zuerst einen kurzen gemeinsamen Stamm und spaltete sich dann auf. Diese Beobachtung deckte sich auch mit allen Silikoninjektions- und den Korrosionspräparaten. Dieses asymmetrische Verhalten der Gefäßaufzweigung wird in einer früheren Studie gezeigt, wird aber in keinem gängigen Veterinäranatomiebuch erwähnt^{46,50,51}. Die Aufspaltung der A. iliaca externa in die A. femoralis und die A. profunda femoris findet beim Schaf schon im Becken statt und nicht wie beim Menschen am Oberschenkel. Gleich ist hingegen, dass beide feine Äste aus der A. iliaca externa zur Versorgung der Muskulatur von Ilium und Abdomen abgeben^{47,49,50,63,64}.

Die ACFL hat bei Schaf und Mensch einen unterschiedlichen Ursprung, ihre Aufteilung in die verschiedenen Rami ist jedoch sehr ähnlich. Beim Schaf entspringt die ACFL normalerweise aus der A. femoralis im Gegensatz zum Menschen, bei dem die ACFL in den meisten Fällen aus der A. profunda femoralis entspringt^{47,50,65}. Unsere Studie zeigte beim Schaf nur eine einzige Variation im Ursprung der ACFL, die auch nur einseitig bei einem Tier auftrat. Bei dieser Variation glich der Abgang des Schafes dem des Menschen. Die ACFL teilt sich wie beim Menschen in ihre Rami ascendens, transversus und descendens. Im Gegensatz zur Beschreibung in der Literatur stellte sich der Ramus transversus in unseren Untersuchungen nicht als makroskopisch sichtbar schwächeres Gefäß im Gegensatz zu den beiden anderen Rami dar⁵⁰. Um dies genau zu belegen ist eine Messung der Gefäßdurchmesser nötig, die im Rahmen dieser Studie nicht durchgeführt wurden. Mit dem 3DVR der CTA, den Silikoninjektionspräparaten sowie den Korrosionspräparaten konnte ein kurzer gemeinsamer Stamm identifiziert werden, der sich in R. transversus und R. ascendens aufteilte. Die Rr. descendens, transversus sowie ascendens zweigt in allen Modalitäten aus der ACFL ab. Die gleiche Aufteilung gilt auch für die ACFL mit der Variation im Ursprung. Beim Menschen hingegen sind

auch verschiedene Varianten für die Abzweigung der Rami bekannt⁶⁵. Der R. ascendens entliess beim Schaf die Endäste für das kraniale vaskuläre Retinakulum, was die Untersuchungen der Silikoninjektionspräparate, der Korrosions Cast sowie der vaskulären Foramina untermauerten. In der Veterinäranatomie ist dem R. ascendens eine Beteiligung an der arteriellen Versorgung des Hüftgelenkes und des Os femoris zugesprochen, aber der genaue Verlauf, sowie die Bildung des kranialen vaskulären Retinakulums konnte erst durch diese Arbeit gezeigt werden⁵⁰. Beim Menschen bildet der R. ascendens der ACFL das anteriore vaskuläre Retinakulum, dessen Bedeutung zur Blutversorgung des Femurkopfes aber gering ist^{9,32,33}. Der R. ascendens der ACFL gab bei den Silikonpräparaten jeweils einen grossen Ast zur Versorgung des Femurkopfes ab. Dieser teilte sich in mehrere feine Endäste, wovon ein etwas größerer zwischen 9 Uhr und 11 Uhr in den Femurkopf zog. Die anderen feinen Endästchen bildeten in der Synovialmembran das kraniale vaskuläre Retinakulum. Bei den Korrosionspräparaten konnte auch jeweils ein prominenter Ast verfolgt werden der zwischen 9 Uhr und 11 Uhr in den Femurkopf zog. In den Korrosionspräparaten zeigten sich auch noch mehrere sehr feine Verästelungen die von kranial an den Femurkopf zogen. Diese Beobachtungen decken sich mit den Ergebnissen Zählung und Verteilung der vaskulären Foramina. Hier zeigte sich der größte Peak zwischen 9 Uhr und 11 Uhr.

Bei allen von uns untersuchten Hüften entsprang die ACFM, wie meistens auch beim Menschen, aus der A. profunda femoris. Untersuchungen bei Menschen haben dagegen gezeigt, dass die ACFM in einigen Fällen auch direkt aus der A. femoralis entspringen kann^{8,47,50}. Im Gegensatz zum Menschen zweigt sie nicht nur ab, sondern führt diese funktionell fort⁵⁰. Beim Menschen kommt eine Abweichung des Ursprungs der ACFM häufiger vor als eine Abweichung des Ursprungs der ACFL⁶⁶. Die ACFM teilt sich beim Schaf und beim Menschen in fünf Äste. Beim Menschen sind dies die Rami superficialis, ascendens, acetabularis, descendens und profundus. Die ovine ACFM teilt sich in die Rami acetabularis, obturatorius, profundus, ascendens und descendens. Die Rr. descendens und ascendens präsentierten sich als starke Gefäße. Die Rr. obturatorius, acetabularis und profundus wurden in dieser Reihenfolge schwächer. Eine genaue Aussage dazu kann nur über eine Messung der Gefässdurchmesser gemacht werden. In dieser Arbeit handelt es sich um eine rein makroskopische Einschätzung. Der R. profundus der ACFM ist der wichtigste Ast in der Blutversorgung des Femurkopfes beim Menschen^{8,9,32,33,67}. Diese Arbeit zeigte, dass auch beim Schaf der

Femurkopf vom R. profundus der ACFM versorgt wird. Unseres Wissens wird in keinem gängigen veterinärmedizinischen Anatomiebuch beim Schaf eine vaskuläre Versorgung des Femurkopfes durch den R. profundus der ACFM beschrieben. In den Silikoninjektionspräparaten sowie bei den Korrosionspräparaten konnten von kaudal mehreren Verästelungen des R. profundus der ACFM verfolgt werden, welche von kaudal an den Femurkopf und die Fossa Trochanterica zogen. Bei den Silikoninjektionspräparaten zog der prominenteste Endast etwa auf 1 Uhr in den Femurkopf ein. Bei der Verteilung und Zählung der vaskulären Foramina gab es von kaudal zwei Peaks, die etwas auseinanderlagen. Der erste Peak zeigte sich etwa zwischen 1 Uhr und 2 Uhr und der zweite Peak etwa zwischen 4 Uhr und 5 Uhr. Diese Peaks stimmten in etwa auch mit unseren Beobachtungen zum Verlauf des R. profundus der ACFM überein. Der R. profundus bildete in der Synovialmembran das kaudale vaskuläre Retinakulum.

Die ACFM stellt die wesentliche Blutversorgung des menschlichen Femurkopfes dar^{8,9,33,67,68}, das Schaf dagegen erhielt seine Blutversorgung durchweg aus Endästen beider Arterien, sowohl der ACFM als auch der ACFL. Während die ACFM und ACFL beim Menschen normalerweise aus der A. profunda femoris entspringen zweigten die ACFL beim Schaf aus der A. femoris und die ACFM aus der A. profunda femoris. Beide Spezies bilden durch die Aufteilung ihrer Endäste vaskuläre Retinacula in der Synovialmembran. Beim Menschen stammen beide wichtigen vaskulären Retinacula, das superiore und das inferiore, aus der ACFM. Es gibt auch feine Äste, die beim Menschen, aus der ACFL entspringen, diese werden aber in der Literatur als unbedeutend erachtet. Das Schaf erhält seine beiden vaskulären Retinacula aus zwei unterschiedlichen Arterien, sein kraniales vaskuläres Retinakulum aus der ACFL und sein kaudales aus der ACFM.

Bei einer Korrektur des Cam-Impingement ist es wichtig, die femurkopfversorgenden Blutgefäße nicht zu verletzen⁸⁻¹⁰. Die Korrektur findet beim dem Tiermodell Schaf dorsal an der Asphärizität auf etwa 12 Uhr statt. Betrachtet man die nähere Umgebung (11-1 Uhr) lagen hier rund 14% der gezählten vaskulären Foramina. Nur etwas unter 5% lagen allerdings zwischen 12 Uhr und 1 Uhr. Weder bei den Silikoninjektionspräparaten noch bei den Korrosionspräparaten konnte im Bereich zwischen 11 Uhr und 1 Uhr eine Eintrittsstelle für ein Gefäß dargestellt werden. Bei den Silikoninjektionspräparaten und Korrosionspräparaten befand sich der am nächsten

dorsal gelegene Gefäßeintritt etwa auf 1 Uhr. Bei den neun operierten Hüften gab es weder in der CT noch in MRI Untersuchung Anzeichen einer avaskulären Femurkopfnekrose. Da das MRI die sensitivste Methode ist, eine frühe avaskuläre Femurkopfnekrose zu detektieren⁶⁹, kann man aus unseren Untersuchungen schlussfolgern, dass bei dem von uns beschriebenen Zugang für eine Off-Set Korrektur unter Erhaltung der femurkopfversorgenden Gefäße möglich ist.

Diese Arbeit hat Limitationen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden keine Anastomosen der ACFM mit der A. glutea kaudalis, die auch noch an der Versorgung des Femurkopfes beteiligt ist, ausgewertet. Da dies ein Tiermodell ist können die Unterschiede in der Gefäßversorgung, angefangen an der Aufzweigung der Aorta bis hin zur Versorgung des Femurkopfes, eine grössere Auswirkung auf die Blutversorgung des proximalen Femurs haben, als bis zum jetzigen Zeitpunkt angenommen. Diese Unterschiede könnten dem vierfüssigen Gang des Schafes geschuldet sein, der nicht genau auf den bipedalen Gang des Menschen übertragen werden kann. Beim Menschen wurden schon verschiedene Studien zur intraossären Blutversorgung des Femurkopfes, zur Identifizierung der Hauptgefäße sowie zu deren genauen Versorgungsgebieten gemacht^{8,9,53,70}. Beim Schaf gibt es dazu noch keine Untersuchung und daher kann nicht gesagt werden, ob das kraniale oder das kaudale vaskuläre Retinakulum die Hauptversorgung des Femurkopfes übernimmt und welches Gebiet sie genau versorgen. Aufgrund der Anzahl der Ästchen welche in den Femurkopf einzogen und deren Durchmesser liegt die Vermutung nahe, dass die ACFM mit ihrem R. profundus das wichtiger der beiden Gefäße ist. Diese Theorie würde sich auch mit Untersuchungen beim Menschen decken³². Bei den Limitationen der Durchführung der Studie muss beachtet werden, dass alle Schafe in dieser Studie weiblich waren. Ob es geschlechtsspezifische Unterschiede gibt, kann daher nicht gesagt werden. Die für die Mazeration verwendeten Femora stammten von Schafen im Alter zwischen 1.5 und 2.5 Jahre. Bei einigen der Tiere war ein Teil der Epiphysenfuge noch sichtbar. Es konnte bei der Auswertung der vaskulären Foramina deshalb häufig nicht mit Sicherheit entschieden werden, ob es sich tatsächlich um ein vaskuläres Foramen handelte oder um einen Teil der Epiphysenfuge. Bei den Injektionspräparaten sowie bei den Korrosionspräparaten wurden tendenziell weniger Eintrittsstellen identifiziert. Es ist deshalb denkbar, dass mehr Foramina gezählt wurden, als tatsächlich Teil der Gefäßversorgung des Femurkopfes sind. Da der Femurkopf des Schafes von Natur aus

asphärisch ist, sind die entstanden Sektoren bei der Zählung und Verteilung der vaskulären Foramina in ihrer Länge nicht gleich, da die am weitesten dorsal und ventral beziehungsweise kranial und kaudal gelegenen Punkte als Markierung gewählt wurden und die Strecke dazwischen immer nur in verhältnismässig gleich grosse Sektoren eingeteilt wurde. Trotz dieser Limitationen lässt sich eine gute Aussage über den Verlauf der femurkopfversorgenden Blutgefässe machen, die eine Antwort auf die Frage der chirurgischen Intervention an der Asphärizität des Femurkopfes beim Schaf zulässt.

6 Schlussfolgerungen

Diese Arbeit identifizierte das kraniale (aus dem R. ascendens der ACFL entspringende) und das kaudale (aus dem R. profundus der ACFM entspringenden) vaskuläre Retinakulum als die extraossären, versorgenden Blutgefässe des Femurkopfes. Es konnte gezeigt werden, dass unter Schonung dieser Gefässe eine Osteochondroplastik zur Korrektur des Cam-Impingements durchgeführt werden kann, ohne eine avaskuläre Femurkopfnekrose zu riskieren. Durch dieses Tiermodell werden weitere, ausführliche Untersuchungen des Cam-Typ FAI ermöglicht. Dadurch könnten schneller Antworten auf die Frage, wann am besten eine chirurgische Intervention beim Cam-Typ FAI durchgeführt wird und wie gross ihr jeweiliger Effekt auf den Schutz des Knorpels ist, gefunden werden.

Ob das kraniale oder das kaudale vaskuläre Retinakulum die Hauptversorgung stellen und ob eines von beiden den Femurkopf alleine versorgen kann sind Fragen, die durch weitere Untersuchungen zu klären sind.

7 Literaturverzeichnis

1. Fiechter RM-E: Am Schafmodell reproduziertes Femoroacetabuläres Impingement, häufigste Ursache der frühen Osteoarthritis beim nichtdysplastischen Hüftgelenk des Menschen. Zürich, 2005.
2. Leunig M, Ganz R: [Femoroacetabular impingement. A common cause of hip complaints leading to arthrosis]. Unfallchirurg 108:9-10, 12-17, 2005.
3. Ganz R, Leunig M, Leunig-Ganz K, et al: The etiology of osteoarthritis of the hip: an integrated mechanical concept. Clin Orthop Relat Res 466:264-272, 2008.
4. Siebenrock KA, Wahab KH, Werlen S, et al: Abnormal extension of the femoral head epiphysis as a cause of cam impingement. Clin Orthop Relat Res:54-60, 2004.
5. Ganz R, Parvizi J, Beck M, et al: Femoroacetabular impingement: a cause for osteoarthritis of the hip. Clin Orthop Relat Res:112-120, 2003.
6. Ito K, Minka MA, Leunig M, et al: Femoroacetabular impingement and the cam-effect. A MRI-based quantitative anatomical study of the femoral head-neck offset. J Bone Joint Surg Br 83:171-176, 2001.
7. Siebenrock KA, Attinger M, Steppacher SD, et al: Femoroacetabular impingement – current understanding, in A. Johari KDKL, J.P. Waddell (ed): Current Progress in Orthopedics, Vol Kryon, 2014, pp 1-26.
8. Gautier E, Ganz K, Krügel N, et al: Anatomy of the medial femoral circumflex artery and its surgical implications. J Bone Joint Surg Br 82:679-683, 2000.
9. SEVITT S, THOMPSON RG: THE DISTRIBUTION AND ANASTOMOSES OF ARTERIES SUPPLYING THE HEAD AND NECK OF THE FEMUR. J Bone Joint Surg Br 47:560-573, 1965.
10. Tannast M, Siebenrock KA: [Open therapy of femoroacetabular impingement]. Oper Orthop Traumatol 22:3-16, 2010.
11. Siebenrock KA, Fiechter R, Tannast M, et al: Experimentally induced cam impingement in the sheep hip. J Orthop Res 31:580-587, 2013.
12. Köhlein W, Ganz R, Impellizzeri FM, et al: Acetabular morphology: implications for joint-preserving surgery. Clin Orthop Relat Res 467:682-691, 2009.
13. Siebenrock K, Wahab KA, Werlen S, et al: Abnormal extension of the femoral head epiphysis as a cause of cam impingement. Clinical orthopaedics and related research 418:54-60, 2004.
14. Stürmer T, Günther KP, Brenner H: Obesity, overweight and patterns of osteoarthritis: the Ulm Osteoarthritis Study. J Clin Epidemiol 53:307-313, 2000.
15. Beck M, Kalhor M, Leunig M, et al: Hip morphology influences the pattern of damage to the acetabular cartilage: femoroacetabular impingement as

- a cause of early osteoarthritis of the hip. *J Bone Joint Surg Br* 87:1012-1018, 2005.
16. Tannast M, Siebenrock KA, Anderson SE: Femoroacetabular impingement: radiographic diagnosis--what the radiologist should know. *AJR Am J Roentgenol* 188:1540-1552, 2007.
 17. Tannast M, Goricki D, Beck M, et al: Hip damage occurs at the zone of femoroacetabular impingement. *Clin Orthop Relat Res* 466:273-280, 2008.
 18. Chegini S, Beck M, Ferguson SJ: The effects of impingement and dysplasia on stress distributions in the hip joint during sitting and walking: a finite element analysis. *J Orthop Res* 27:195-201, 2009.
 19. Lecerf G, Fessy MH, Philippot R, et al: Femoral offset: anatomical concept, definition, assessment, implications for preoperative templating and hip arthroplasty. *Orthop Traumatol Surg Res* 95:210-219, 2009.
 20. Büchler L, Neumann M, Schwab JM, et al: Arthroscopic versus open cam resection in the treatment of femoroacetabular impingement. *Arthroscopy* 29:653-660, 2013.
 21. Sabetta E, Scaravella E: Treatment of pincer-type femoroacetabular impingement. *Joints* 3:78-81, 2015.
 22. Zumstein M, Hahn F, Sukthankar A, et al: How accurately can the acetabular rim be trimmed in hip arthroscopy for pincer-type femoral acetabular impingement: a cadaveric investigation. *Arthroscopy* 25:164-168, 2009.
 23. Ganz R, Gill TJ, Gautier E, et al: Surgical dislocation of the adult hip a technique with full access to the femoral head and acetabulum without the risk of avascular necrosis. *J Bone Joint Surg Br* 83:1119-1124, 2001.
 24. Zilkens C, Miese FR, Crumbiegel C, et al: Magnetic resonance imaging and histology of ovine hip joint cartilage in two age populations: a sheep model with assumed healthy cartilage. *Skeletal Radiol* 42:699-705, 2013.
 25. Ficat RP: Idiopathic bone necrosis of the femoral head. Early diagnosis and treatment. *J Bone Joint Surg Br* 67:3-9, 1985.
 26. Mont MA, Marulanda GA, Jones LC, et al: Systematic analysis of classification systems for osteonecrosis of the femoral head. *J Bone Joint Surg Am* 88 Suppl 3:16-26, 2006.
 27. Gardeniers J: ARCO Committee on Terminology and Staging. A new proposition of terminology and an international classification of osteonecrosis. *ARCO Newsl* 3:153-159, 1991.
 28. Fordyce MJ, Solomon L: Early detection of avascular necrosis of the femoral head by MRI. *J Bone Joint Surg Br* 75:365-367, 1993.
 29. Markisz JA, Knowles RJ, Altchek DW, et al: Segmental patterns of avascular necrosis of the femoral heads: early detection with MR imaging. *Radiology* 162:717-720, 1987.

30. Totty WG, Murphy WA, Ganz WI, et al: Magnetic resonance imaging of the normal and ischemic femoral head. *AJR Am J Roentgenol* 143:1273-1280, 1984.
31. Mitchell DG, Rao VM, Dalinka MK, et al: Femoral head avascular necrosis: correlation of MR imaging, radiographic staging, radionuclide imaging, and clinical findings. *Radiology* 162:709-715, 1987.
32. TUCKER FR: Arterial supply to the femoral head and its clinical importance. *J Bone Joint Surg Br* 31B:82-93, 1949.
33. TRUETA J, HARRISON MH: The normal vascular anatomy of the femoral head in adult man. *J Bone Joint Surg Br* 35-B:442-461, 1953.
34. Taylor SD, Tsiridis E, Ingham E, et al: Comparison of human and animal femoral head chondral properties and geometries. *Proc Inst Mech Eng H* 226:55-62, 2012.
35. Bergmann G, Siraky J, Rohlmann A, et al: A comparison of hip joint forces in sheep, dog and man. *J Biomech* 17:907-921, 1984.
36. Bergmann G, Graichen F, Rohlmann A: Hip joint forces in sheep. *J Biomech* 32:769-777, 1999.
37. Taylor WR, Ehrig RM, Heller MO, et al: Tibio-femoral joint contact forces in sheep. *J Biomech* 39:791-798, 2006.
38. Govoni VM, Rahal SC, Agostinho FS, et al: Goniometric measurements of the forelimb and hindlimb joints in sheep. *Vet Comp Orthop Traumatol* 25:297-300, 2012.
39. Mazoochian F, Hölzer A, Jalali J, et al: Finite element analysis of the ovine hip: development, results and comparison with the human hip. *Vet Comp Orthop Traumatol* 25:301-306, 2012.
40. Nunamaker DM: Experimental models of fracture repair. *Clin Orthop Relat Res*:S56-65, 1998.
41. Valdes AM, Spector TD: The contribution of genes to osteoarthritis. *Rheum Dis Clin North Am* 34:581-603, 2008.
42. Vandeweerdt JM, Hontoir F, Kirschvink N, et al: Prevalence of naturally occurring cartilage defects in the ovine knee. *Osteoarthritis Cartilage* 21:1125-1131, 2013.
43. Byers PD, Contepomi CA, Farkas TA: A post mortem study of the hip joint. Including the prevalence of the features of the right side. *Ann Rheum Dis* 29:15-31, 1970.
44. Phillips TW, Johnston G, Wood P: Selection of an animal model for resurfacing hip arthroplasty. *J Arthroplasty* 2:111-117, 1987.
45. Frewein J: *Bewegungsapparat* (ed 8., unveränd. Aufl). Stuttgart, Stuttgart : Parey, 2004.
46. König HE: *Anatomie der Haussäugetiere : Lehrbuch und Farbatlas für Studium und Praxis*. Stuttgart [etc., Stuttgart [etc.] : Schattauer, 1999.
47. Standring S, Standring, Gray H: *Gray's Anatomy*, 2008.

48. Popesko P: Atlas der topographischen Anatomie der Haustiere (ed 4., durchges. Aufl.). Stuttgart, Stuttgart : Enke, 1993.
49. Joscht M, Martin M, Henin M, et al: Angiographic Anatomy of External Iliac Arteries in the Sheep. *Anat Histol Embryol* 45:443-449, 2016.
50. Habermehl K-H: Kreislaufsystem, Haut und Hautorgane (ed 4., unveränderte Aufl.). Stuttgart, Stuttgart : Parey Verlag, 2005.
51. Popesko P: Atlas der topographischen Anatomie der Haustiere (ed 7., unveränderte Aufl.). Stuttgart, Stuttgart : Enke, 2011.
52. Salomon F-V, Achilles W: Anatomie für die Tiermedizin (ed 2., überarb. u. erw. Aufl.). Stuttgart, Stuttgart : Enke Verlag, 2008.
53. Lavigne M, Kalhor M, Beck M, et al: Distribution of vascular foramina around the femoral head and neck junction: relevance for conservative intracapsular procedures of the hip. *Orthop Clin North Am* 36:171-176, viii, 2005.
54. Vahlensieck M, Baur-Melnyk A: MRT des Bewegungsapparats (ed 4., vollst. überarb. und erw. Auflage). Stuttgart, Stuttgart : Georg Thieme, 2015.
55. Harris WH: Etiology of osteoarthritis of the hip. *Clin Orthop Relat Res*:20-33, 1986.
56. Murray RO: The aetiology of primary osteoarthritis of the hip. *Br J Radiol* 38:810-824, 1965.
57. Wyles CC, Norambuena GA, Howe BM, et al: Cam Deformities and Limited Hip Range of Motion Are Associated With Early Osteoarthritic Changes in Adolescent Athletes: A Prospective Matched Cohort Study. *Am J Sports Med* 45:3036-3043, 2017.
58. Solomon L: Patterns of osteoarthritis of the hip. *J Bone Joint Surg Br* 58:176-183, 1976.
59. McCormick F, Kleweno CP, Kim YJ, et al: Vascular safe zones in hip arthroscopy. *Am J Sports Med* 39 Suppl:64S-71S, 2011.
60. Nötzli HP, Siebenrock KA, Hempfing A, et al: Perfusion of the femoral head during surgical dislocation of the hip. Monitoring by laser Doppler flowmetry. *J Bone Joint Surg Br* 84:300-304, 2002.
61. Sussmann PS, Ranawat AS, Lipman J, et al: Arthroscopic versus open osteoplasty of the head-neck junction: a cadaveric investigation. *Arthroscopy* 23:1257-1264, 2007.
62. Sussmann PS, Ranawat AS, Shehaan M, et al: Vascular preservation during arthroscopic osteoplasty of the femoral head-neck junction: a cadaveric investigation. *Arthroscopy* 23:738-743, 2007.
63. Bilhim T, Pereira JA, Fernandes L, et al: Angiographic anatomy of the male pelvic arteries. *AJR Am J Roentgenol* 203:W373-382, 2014.
64. Moore KL, Dalley AF, Agur AM: Clinically oriented anatomy, Lippincott Williams & Wilkins, 2013.

65. Fukuda H, Ashida M, Ishii R, et al: Anatomical variants of the lateral femoral circumflex artery: an angiographic study. *Surg Radiol Anat* 27:260-264, 2005.
66. Prakash, Kumari J, Kumar Bhardwaj A, et al: Variations in the origins of the profunda femoris, medial and lateral femoral circumflex arteries: a cadaver study in the Indian population. *Rom J Morphol Embryol* 51:167-170, 2010.
67. Lazaro LE, Klinger CE, Sculco PK, et al: The terminal branches of the medial femoral circumflex artery: the arterial supply of the femoral head. *Bone Joint J* 97-B:1204-1213, 2015.
68. TRUETA J: The normal vascular anatomy of the human femoral head during growth. *J Bone Joint Surg Br* 39-B:358-394, 1957.
69. Mitchell MD, Kundel HL, Steinberg ME, et al: Avascular necrosis of the hip: comparison of MR, CT, and scintigraphy. *AJR Am J Roentgenol* 147:67-71, 1986.
70. Zlotorowicz M, Czubak J, Kozinski P, et al: Imaging the vascularisation of the femoral head by CT angiography. *J Bone Joint Surg Br* 94:1176-1179, 2012.

8 Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
Aa.	Arteriae
ACFL	Arteria circumflexa femoris
ACFM	Arteria circumflexa femoris medialis
AVN	Avaskuläre Femurkopfnekrose
AROC	Association Research Circulation Osseous
bzw.	beziehungsweise
C	Celsius
CT	Computertomographie
CTA	Computertomographische Angiographie
dGEMRIC	delayed gadolinium enhanced MRI of cartilage
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
FK	Femurkopf
g	Gramm
G	Gauge
i.m.	intramuskulär
i.v.	intravenös
L	Lendenwirbel
mg	Milligramm
ml	Milliliter
M.	Musculus
Mm.	Musculi
MPR	multiplanare Reformation
MRI	Magnetresonanztomographie
NaCl	Natriumchlorid
FAI	Femoroacetabuläres Impingement
PAO	Periacetabuläre Osteotomie
M.	Musculus
R.	Ramus
Rr.	Rami
vgl.	vergleiche
3DVR	Dreidimensionales Volumen Rendering

9 Danksagung

Mein Dank gilt Frau Prof. Dr. Brigitte von Rechenberg für die Aufnahme in ihr Team, die Überlassung des Themas und vor allem für das offene Ohr und den herzlichen Umgang. Ich danke Prof. Dr. Moritz Tannast für die tolle Betreuung meiner Doktorarbeit. Seine immer motivierende, geduldige und unermüdlich positive Art sowie die vielen konstruktiven Gespräche waren immer eine grosse Unterstützung. Einen grossen Dank auch an Frau Dr. Katja Nuss für die Hilfe bei meiner Arbeit, und die netten Zusammenkünfte in Tiengen. Prof. Dr. Klaus Siebenrock danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Danken möchte ich auch meinem Team an der MSRU: Karina Klein, Flurina Clement Frey, Sabine Koch, Salim Darwiche, Agnieszka Karol, Sophie Schöberl, Philipp Kindt, Jola Plihal, Anika Drechsler, Julia Freudenhammer, Lena, Müller, Maren Stempel-Estelmann, Valentin Reichle, Michael Künzer, Alexandra Grob, Mario Benn und Ramon Bucher sowie unseren Anästhesisten Peter Kronen und Dagmar Verdino.

Vielen Dank auch an das Labor Team um Aymone Lenisa und Ladina Ferguson Ettinger.

Dem Team vom Inselspital ein herzliches Dankeschön: Simon Steppacher, Till Lerch, Corinne Zurmühle, Markus Hanke, Florian Schmaranzer.

Urs Müller danke ich für die fachmännische Hilfe beim Herstellen der Präparate und die grosszügige Bereitstellung seiner professionellen Fotoausrüstung. Ohne ihn wären niemals so schöne Bilder zu Stande gekommen. Auch an Katrin Süss vielen herzlichen Dank.

Bei den Tierpflegern und Fahrern des Tierspitals Zürich, besonders Silvana Resegatti, sowie der Familie Knüsel vom Staffeleghof möchte ich mich für die gute Betreuung der Schafe bedanken.

Bedanken möchte ich mich auch bei Gaby Schmid, Nicole Krämer und Ljubica Dimbrek für die Hilfe bei den administrativen Angelegenheiten sowie Rainer Egle für die immer sehr kompetente Unterstützung in Computerangelegenheiten.

Danksagung

Von ganzem Herzen danke ich meinem Mann Lukas für seine unglaubliche Unterstützung, seine immer motivierende Art und einfach nur dafür, dass es ihn gibt!

Meiner Mutter Heidi, meinen Geschwistern Jasmina, Karima und Jonas, meiner Tante Helga und meinem Onkel Stefan, sowie meinen Schwiegereltern Gertrud und Albert mit Johanna möchte ich dafür danken, dass ich mich immer auf eure Unterstützung verlassen kann!

Bei meinen Freundinnen Franziska Harich, Andrea Perino und Annabell Diebel möchte ich mich für die lange Freundschaft und vor allem die moralische Unterstützung bedanken.

Zum Schluss möchte ich besonders an die Tiere erinnern, die im Dienste der Wissenschaft stehen. An jedes einzelne von ihnen. Sie leisten einen unglaublichen Anteil am heutigen Stand der Medizin und dies sollten wir täglich mit grösstem Respekt zurückgeben.

10 Lebenslauf

Vorname Name	Nadja Wolfer
Geburtsdatum	15.10.1985
Geburtsort	Villingen-Schwenningen
Nationalität	deutsch
9/1996– 6/2005	Gymnasium, Titisee-Neustadt, Deutschland
24.06.2005	Abitur, Kreisgymnasium Hochschwarzwald, Titisee-Neustadt, Deutschland
10/2006 – 3/2012	Studium Veterinärmedizin, Justus-Liebig-Universität, Giessen, Deutschland
16.03.2012	Staatsexamen Veterinärmedizin, Justus-Liebig Universität, Giessen, Deutschland
11/2012 – 3/2013	Assistentztierärztin, Tierklinik Partners, Wehr, Deutschland
04/2013 – 5/2013	Assistentztierärztin, Tierklinik am Kreis, Netstal, Schweiz
8/2013 – 7/2015	Doktorandin, Musculoskeletal Research Unit (MSRU), Vetsuisse-Fakultät, Universität Zürich, Schweiz
8/2015 – 7/2016	Intern, Pferdeklinik Grosswallstadt, Grosswallstadt, Deutschland
11/2016 – 6/2017	Assistentztierärztin, Tierklinik Partners, Wehr, Deutschland
7/2017 – dato	Resident, Klinik für Bildgebende Diagnostik, Vetsuisse-Fakultät, Universität Zürich, Schweiz

11 Anhang

ID/Sektor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
FKR1	0	2	1	0	1	0	0	0	2	2	2	1
FKR2	1	2	1	1	0	0	0	1	3	2	1	0
FKR3	0	1	0	0	1	0	0	0	0	2	1	2
FKR4	0	2	1	1	0	2	1	3	1	1	2	1
FKR5	0	1	0	0	2	0	0	0	1	2	1	1
FKR6	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	2
FKR7	0	1	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0
FKR8	0	1	1	0	1	0	0	0	0	2	1	0
FKR9	1	2	1	0	1	1	2	1	0	1	1	1
FKR10	1	3	1	0	2	0	0	0	2	1	2	0
FKL1	1	2	1	0	1	0	0	0	0	3	1	1
FKL2	1	1	1	0	1	0	0	0	0	2	1	1
FKL3	1	3	0	0	0	1	0	0	0	2	1	1
FKL4	1	1	1	0	1	0	0	0	0	2	0	1
FKL5	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	2	1
FKL6	0	1	0	1	1	1	0	0	0	2	2	0
FKL7	0	1	0	0	3	0	0	0	0	1	1	0
FKL8	0	1	0	0	2	0	0	0	1	2	1	1
FKL9	0	2	1	0	1	0	0	1	1	2	1	1
FKL10	0	1	2	0	1	0	2	0	1	2	2	2

Tabelle 5: Anzahl der gezählten vaskulären Foramina im Bereich des Femurkopf-/ halsübergangs beim Schaf. Hierfür wurde der Femurkopf-/ halsübergang analog eines Uhrsystems in 12 Sektoren geteilt. Die Fläche 10mm distal des Randes der Gelenkfläche wurde bei der Zählung berücksichtigt. Sektor 1 entspricht dem Abschnitt zwischen 12 Uhr und 1 Uhr. ID = Identifikation des Femurkopfes, FKR = rechter Femurkopf, FKL = linker Femurkopf